



Détermination de la réduction d'épaisseur d'une tôle en acier enrobée

-

Étude de faisabilité d'une méthode de mesure physique électromagnétique

février - juin 2005

Page laissée intentionnellement blanche.

Remerciements

Mes remerciements s'adressent à M. Gauthier VERCOUTERE et Ghislain THOMAS, tuteurs de mon stage, pour leurs recommandations, encouragements et conseils.

Merci à M. Thierry SOLLIER, responsable du LCME, pour son accueil au sein de son laboratoire.

Ma gratitude va également à Mme Catherine GILLES PASCAUD et à M. Jean-Marc DECITRE, pour l'accueil qu'ils m'ont réservé ainsi que pour la présentation de leurs activités.

Je remercie particulièrement M. Eric BORDAS de m'avoir fait part de ses connaissances et de son savoir-faire.

Mes remerciements à M. Jean-LUC LECHIEN pour son aide et son avis.

Merci aussi à Mme Marie-Odile BOURDEAU pour son attention et sa bienvenue.

Merci, encore, aux personnes dont je manque de mentionner le nom pour leurs avis et leur aide précieux ainsi que pour leur sympathie et leur savoir-vivre durant mon séjour.

Sommaire

| | |
|--|----|
| Remerciements | 3 |
| Sommaire..... | 4 |
| Illustrations | 5 |
| Synthèse | 6 |
| Synthesis..... | 7 |
| Symboles, Acronymes et mots-clé..... | 8 |
| 1. Présentation de l'environnement industriel | 9 |
| 1.1. CEA..... | 9 |
| 1.1.1. Pôle Recherche Technologique..... | 11 |
| 1.1.2. LIST | 11 |
| 1.1.3. DETECS | 11 |
| 1.1.4. LCME | 11 |
| 1.2. EDF..... | 12 |
| 1.2.1. L'organisation | 12 |
| 1.2.2. EDF R&D | 13 |
| 1.2.3. Chiffres-clés | 14 |
| 1.3. Partenariat | 15 |
| 2. Problématique du projet | 16 |
| 2.1. Contexte..... | 16 |
| 2.2. Données techniques de la problématique..... | 17 |
| 2.3. Objectif et perspective du projet de fin d'études | 18 |
| 3. Recherche documentaire..... | 19 |
| 3.1. Bibliographie EDF | 19 |
| 3.2. Bibliographie CEA..... | 19 |
| 3.3. Bibliographie BONNA SABLA | 19 |
| 3.4. Internet | 19 |
| 3.5. Bilan de la recherche | 20 |
| 4. Le Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault | 21 |
| 4.1. Rappel du principe des courants de Foucault | 21 |
| 4.2. Le CND | 21 |
| 4.3. L'effet de peau..... | 22 |
| 5. Simulation numérique | 23 |
| 5.1. Le code de calcul CIVA..... | 23 |
| 5.2. Dispositifs simulés..... | 23 |
| 5.3. Calculs effectués | 23 |
| 5.4. Résultats de simulation | 25 |
| 6. Essais expérimentaux..... | 29 |
| 6.1. Le moyen d'essai | 29 |
| 6.2. Les essais réalisés | 30 |
| 6.2.1. Mesures SANS ARMATURE | 30 |
| 6.2.2. Mesures AVEC ARMATURE | 32 |
| 6.2.3. Mesure de la distance surface – armature | 34 |
| 6.3. Procédure de mesure | 34 |
| 7. Conclusion | 35 |
| Annexes | 37 |
| Index alphabétique | 48 |
| Bibliographie | 49 |

Illustrations

Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Paramètres dimensionnels de la conduite BONNA | 18 |
| Tableau 2 : Valeurs étudiées des paramètres dimensionnels..... | 24 |
| Tableau 3 : Valeurs de e et E étudiées en simulation | 25 |
| Tableau 4 : Valeurs de σ et μ_r étudiées en simulation | 26 |
| Tableau 5 : Valeurs de σ étudiées simulant la corrosion | 27 |
| Tableau 6 : Valeurs des paramètres influents étudiées lors des essais..... | 31 |
| Tableau 7 : Résultats des mesures effectués sur le tronçon de conduite déposé | 43 |

Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Le CEA en France | 9 |
| Figure 2 : Organigramme du CEA | 10 |
| Figure 3 : Position du LCME au sein du CEA..... | 10 |
| Figure 4 : Organigramme EDF | 12 |
| Figure 5 : Organigramme de la division R&D | 13 |
| Figure 6 : Production d'électricité en 2004 : 610 TWh..... | 15 |
| Figure 7 : Evolution du chiffre d'affaires entre 2003 et 2004..... | 15 |
| Figure 8 : Schéma de fonctionnement d'un CNPE nucléaire | 16 |
| Figure 9 : Fabrication et structure d'une conduite BONNA âme tôle | 17 |
| Figure 10 : Vue détaillée de la structure d'une conduite BONNA | 17 |
| Figure 11 : Repérage des données dimensionnelles | 17 |
| Figure 12 : Schéma en coupe d'un capteur à 3 bobines..... | 19 |
| Figure 13 : Freinage par induction | 21 |
| Figure 14 : Inspection d'un tube (sonde interne)..... | 21 |
| Figure 15 : Induction de CF dans une plaque métallique | 21 |
| Figure 16 : Effet de peau – variation de l'amplitude et de la phase | 22 |
| Figure 17 : Vue en coupe de l'environnement simulé par <i>CIVA-CF messine</i> | 24 |
| Figure 18 : B_z (μT) fonction de l'épaisseur résiduelle e et de l'entrefer E à 10 Hz..... | 25 |
| Figure 19 : B_z (μT) fonction de la conductivité σ et de la perméabilité relative μ_r à 10 Hz | 26 |
| Figure 20 : Effet de la corrosion sur B_z (μT) à 10 Hz | 27 |
| Figure 21 : B_z (μT) fonction de la conductivité σ et de la perméabilité relative μ_r à 5 kHz | 28 |
| Figure 22 : Schéma de principe de mesure du fluxgate | 29 |
| Figure 23 : Capteur fluxgate (vue de dessous) | 30 |
| Figure 24 : Schéma du montage expérimental SANS ARMATURE..... | 30 |
| Figure 25 : Mesure de B_z fonction de l'épaisseur e et de l'entrefer E à 10 Hz SANS ARMATURE | 31 |
| Figure 26 : Schéma du montage expérimental AVEC ARMATURE | 32 |
| Figure 27 : Vue de la tôle d'acier, de l'armature et de leurs repères..... | 32 |
| Figure 28 : Capteur fluxgate sur la maquette plane d'essai..... | 32 |
| Figure 29 : Mesure de B_z fonction de l'épaisseur e et de l'entrefer E à 10 Hz AVEC ARMATURE..... | 33 |
| Figure 30 : Mesure de B_z fonction de la distance surface – armature à 5 kHz..... | 34 |
| Figure 31 : Schéma en coupe du joint inter-tronçon | 41 |
| Figure 32 : Machine d'induction de Foucault (1855)..... | 46 |

Synthèse

Ce document constitue le rapport de mon projet de fin d'études à l'**Ecole Nationale Supérieure de Physique de Grenoble** dans la filière **Instrumentation Physique**.

Il expose mon étude de faisabilité d'une méthode de mesure physique électromagnétique en vue de la détermination de la réduction d'épaisseur d'une tôle en acier enrobée.

Cette tôle en acier est constitutive d'une conduite d'eau, puisée en mer ou en rivière, et sous pression alimentant un circuit de refroidissement de centrale nucléaire EDF. Le circuit est classé **Important** Pour la **Sûreté** et doit donc être étanche et résistant. L'acier de ces conduites (tôle cylindrique étanche et armature) est soumis à la corrosion.

EDF souhaite, dans le cadre du maintien en conditions opérationnelles du circuit, disposer d'un outil permettant de déceler la réduction de l'épaisseur de la tôle cylindrique.

Mon projet de fin d'études a eu pour but de déterminer la faisabilité d'une telle mesure au moyen d'une méthode de **Contrôle Non Destructif** électromagnétique.

Dans une première partie, vous trouverez dans ce document une présentation du **Commissariat à l'Energie Atomique** ainsi que des unités allant jusqu'au **Laboratoire de Contrôle par Méthodes Electromagnétiques** au sein duquel s'est déroulé mon projet de fin d'études. Il présente également l'EDF et particulièrement sa R&D à laquelle est rattaché Gauthier VERCOUTERE, le responsable de ce stage.

La deuxième expose la problématique du projet entrepris ainsi que son enjeu, la description des conduites BONNA et les axes de l'étude.

Le fruit d'une recherche bibliographique est présenté dans une troisième partie.

La quatrième partie rappelle le principe des courants de Foucault appliqués au **Contrôle Non Destructif**.

Les deux chapitres qui succèdent présentent, le logiciel utilisé pour la simulation (CIVA-CF/Messine) et les résultats des essais expérimentaux réalisés.

Les annexes apportent des compléments d'information au sujet du projet de fin d'études, de la société BONNA SABLA, des caractéristiques dimensionnelles des conduites, du moyen d'essai utilisé lors des essais et une biographie de Jean Bernard Léon Foucault.

Une première série d'essais **SANS ARMATURE** a été menée apportant des résultats concluants.

La corrélation entre la simulation et les essais est très bonne.

La prise en compte de l'armature du béton modifie les valeurs de mesure, ce qui était pressenti. Une connaissance de sa position est nécessaire afin d'interpréter correctement les mesures.

Les informations *épaisseur de tôle* et *entrefer* peuvent être séparées des signaux de mesure. Le niveau des signaux renseignant sur l'épaisseur de la tôle est cependant 29 dB plus faible que celui concernant l'entrefer.

La discrimination entre une tôle de 0,5 mm d'épaisseur et une autre de 2 mm, est possible.

Ce projet de fin d'études a permis de vérifier la faisabilité de la détermination de la réduction d'épaisseur d'une tôle en acier enrobée au moyen d'une méthode de mesure physique électromagnétique.

Synthesis

This document constitutes the report of my studies end project at the **Ecole Nationale Supérieure de Physique de Grenoble** in the **Physical Instrumentation** die.

It exposes my feasibility study of a physical electromagnetic measurement method for the determination of the thickness reduction of a sheet steel coated.

This sheet steel is constitutive of a pipeline water, drawn at sea or river, and pressured feeding a coolant circuit of nuclear thermal power station EDF. The circuit is classified Important For Safety and must thus be tight and resistant. The steel of these conduits (cylindrical sheet seals and braces) is subjected to corrosion.

EDF wishes, within the framework of maintains in operational conditions the circuit, to have a tool making it possible to detect the reduction thickness of cylindrical sheet.

The purpose of my studies end project was to determine the feasibility of such a measurement by means of an electromagnetic method of **Non Destructive Testing**.

In a first part, you will find in this document a presentation of the **Commissariat à l'Energie Atomique** (Commission of the Atomic Energy) as of the units active to the **Laboratoire de Contrôle par Méthodes Electromagnétiques** (Laboratory of Control by Electromagnetic Methods) in which my studies end project proceeded. It also presents EDF and particularly its R&D to which Gauthier VERCOUTERE is attached, the person in charge for this training course.

The second exposes the problems of the project undertaken like its stake, the description of BONNA's conduits and the axes of the study.

The fruit of a library search is presented in a third part.

The fourth part points out the principle of the eddy currents applied to the Non Destructive Testing.

The two chapters which succeed present, the software used for simulation (CIVA-CF/Messine) and the results of the experimental tests carried out.

The appendices bring further information on the subject of the studies end project, BONNA SABLA company, the dimensional specifications of the conduits, the test facility used during the tests and a biography of Jean Bernard Leon Foucault.

A first series of tests WITHOUT REINFORCEMENT was carried out producing conclusive results.

The correlation between simulation and the tests is very good.

The taking into account of the reinforcement of the concrete modifies the values of measurement, which was had a presentiment of. A knowledge of its position is necessary in order to interpret measurements correctly.

Information thickness of sheet and air-gap can be separated from the signals of measurement. The level of the signals informing about the thickness of sheet is however 29 dB weaker than that relating to the air-gap.

Discrimination between a sheet of 0,5 mm thickness and another of 2 mm, is possible.

This studies end project made it possible to check the feasibility of the determination of the thickness reduction of a sheet steel coated by means of a physical electromagnetic measurement method.

Symboles, Acronymes et mots-clé

| Symbole | Grandeur physique | Unité |
|----------|---|---|
| F | Fréquence | Hertz (Hz) |
| I | Courant électrique | Ampère (A) |
| B | Induction magnétique ¹ ($\mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$) | Tesla (T) ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$) |
| H | Champ magnétique (Excitation) | $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ |
| μ_0 | Perméabilité du vide ($4\pi \cdot 10^{-7}$) | $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ($\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{C}^{-2}$) |
| μ_r | Perméabilité relative ² | sans |
| μ | Perméabilité absolue ($\mu_0 \cdot \mu_r$) | $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ($\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{C}^{-2}$) |
| σ | Conductivité ³ | $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ |
| e | Epaisseur de tôle | m |
| E | Entrefer (distance capteur-tôle) | m |
| δ | Profondeur de pénétration standard | m |

| Acronyme | Signification |
|----------|---|
| CF | Courants de Foucault |
| EC | Eddy Currents |
| CND | Contrôle Non Destructif |
| NDT | Non Destructive Testing |
| ATM | Ame Tôle Moulée |
| CFCL | CF en Champ Lointain |
| RFEC | Remote Field Eddy Currents |
| PPIC | Pressure Pipe Inspection Company |
| PCCP | Pre-stressed Concrete Cylinder Pipe |
| CNPE | Centre National de Production d'Electricité |

Mots-clé : contrôle non destructif, capteur, fluxgate, courants de Foucault, conduite BONNA, béton armé, armature, âme tôle moulée, corrosion, acier, simulation numérique, CIVA, mesure d'épaisseur, effet de peau, champ, induction électromagnétique, perméabilité, conductivité, conductibilité.

¹ Ou densité de flux magnétique (appelée champ magnétique par abus de langage).

² Par rapport au vide.

³ La conductivité (ou conductibilité) électrique d'une substance est une mesure de sa capacité à laisser circuler un courant électrique. La conductibilité est mesurée en unité de conductance par unité de longueur.

1. Présentation de l'environnement industriel

Ce premier chapitre présente le Commissariat à l'Energie Atomique et les unités jusqu'au Laboratoire de Contrôle par Méthodes Electromagnétiques (CEA/PRT/LIST/DETECS/SYSSC/LCME).

Il présente également EDF et particulièrement sa R&D.

Les données présentées sont issues des sites Internet et Intranet du CEA [1] et d'EDF [2].

1.1. CEA

Depuis sa création en 1945, le CEA a réalisé les moyens nucléaires de la force de dissuasion, permis le développement d'une industrie électronucléaire de premier rang mondial et fortement contribué à la constitution d'une industrie de la microélectronique. Le CEA a aussi joué, avec le CNRS, un rôle-clé pour doter la communauté scientifique d'infrastructures lourdes de recherche.

S'identifiant comme un organisme de recherche à vocation principalement technologique, le CEA a également une activité intégrée de recherche fondamentale. Celle-ci lui permet notamment de maîtriser les avancées scientifiques acquises par l'ensemble de la communauté scientifique internationale dont il est ainsi une partie prenante dynamique.

Fort de ses réussites passées, qui fondent sa légitimité, le CEA élabore sa stratégie autour de trois axes forts impliquant la conduite de grands projets technologiques :

- La défense et la sécurité nationales,
- L'énergie, hors le champ des combustibles fossiles,
- Les technologies pour l'information et la santé.

Dans ces domaines, le CEA conduit des recherches dans tout le spectre nécessaire à la réussite de ses projets, des aspects technologiques les plus finalisés jusqu'aux recherches les plus fondamentales, tant en sciences de la matière qu'en sciences du vivant.

A travers la diversité de ses programmes, il poursuit deux objectifs majeurs : devenir le premier organisme européen de recherche technologique et garantir la pérennité de la dissuasion nucléaire.

Ses atouts pour y parvenir : une culture croisée ingénieurs-chercheurs, propice aux synergies entre recherche fondamentale et innovation technologique ; des installations exceptionnelles (supercalculateur, réacteurs de recherches, grands instruments de la physique, lasers de puissance...) ; enfin, une réelle implication dans le tissu industriel et économique.

Implanté sur 9 centres répartis dans toute la France, le CEA bénéficie d'une forte insertion régionale et de solides partenariats avec les autres organismes de recherche, collectivités locales et universités nationales et étrangères. Afin de favoriser le transfert des connaissances, il accorde une importance particulière à l'enseignement et à l'information du public.

Reconnu comme un expert dans ses domaines de compétences, le CEA est pleinement inséré dans l'espace européen de la recherche et exerce une présence croissante au niveau international.

Quelques chiffres

- 14 911 salariés en 2004 (46,6 % de cadres, ingénieurs, chercheurs – 70 % de civils),
- Budget 2,7 milliards d'euros,
- 1 689 brevets déposés ou en vigueur,
- 1 300 contrats signés avec l'industrie,
- 83 nouvelles entreprises créées depuis 1984 dans le secteur des hautes technologies,
- 9 centres de recherche.

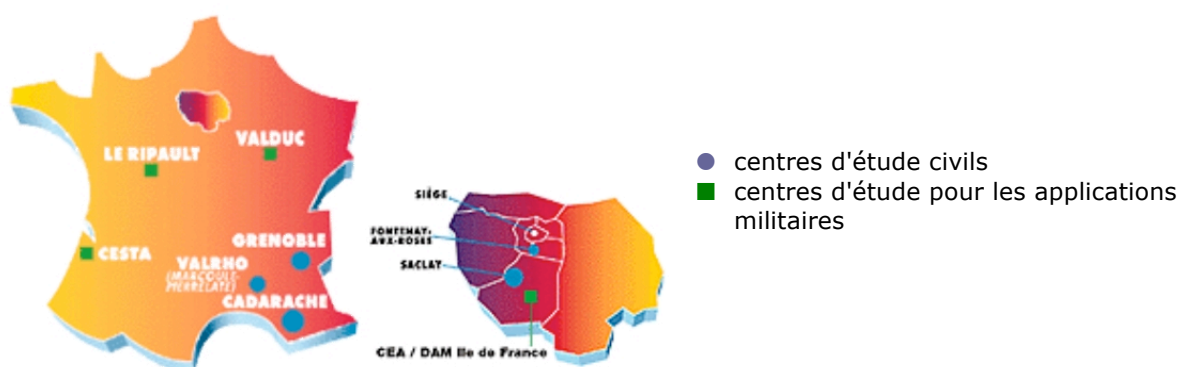


Figure 1 : Le CEA en France

Organisation du CEA

Le CEA est organisé autour de deux groupes de 4 pôles. Les pôles opérationnels sont :

- le pôle défense : la DAM (Direction des Applications Militaires),
- le pôle nucléaire : la DRN (Direction des Réacteurs Nucléaires),
- le pôle recherche technologique : la DRT (Direction de la Recherche Technologique),
- le pôle recherche : la DSM (Direction de la Science de la Matière) et la DSV (Directions des Sciences du Vivant).

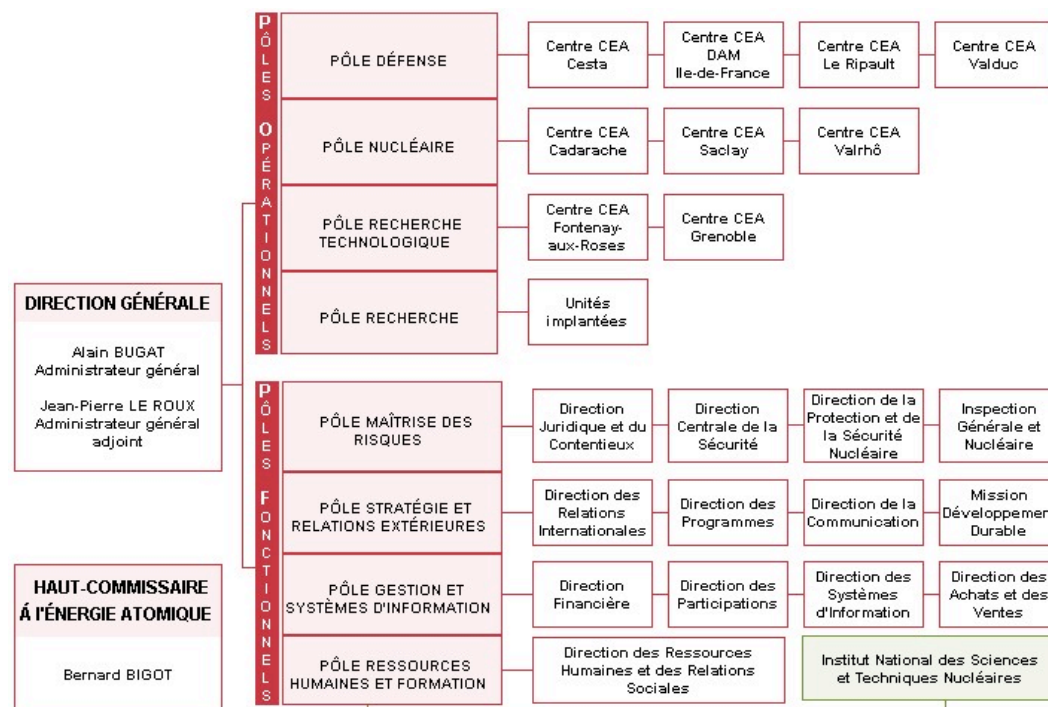


Figure 2 : Organigramme du CEA

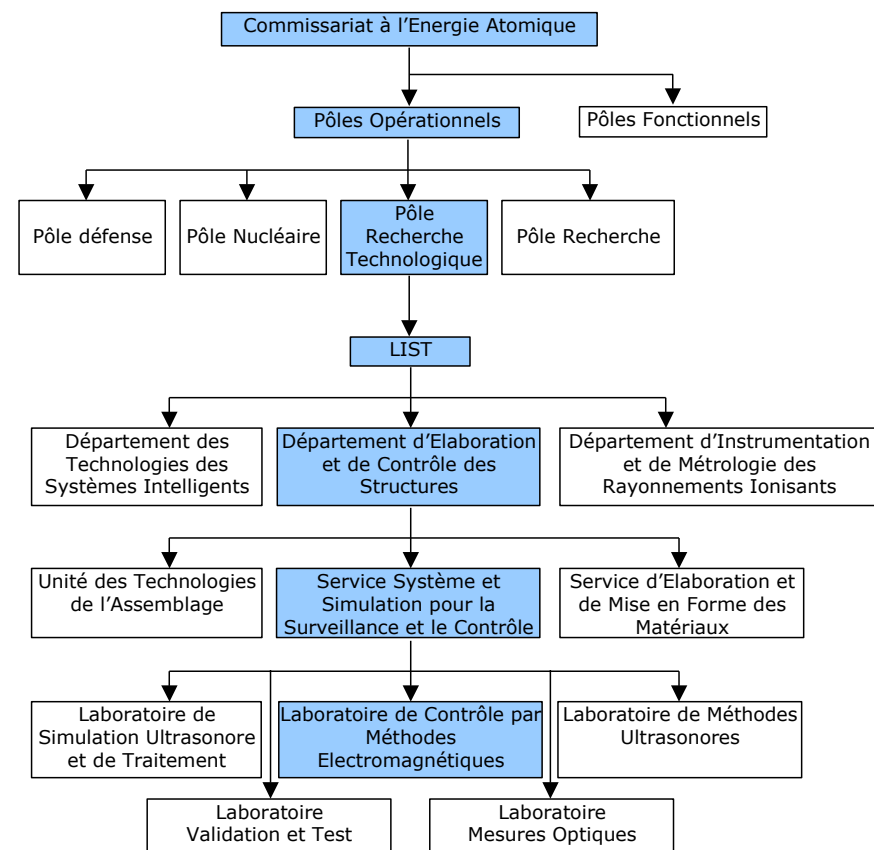


Figure 3 : Position du LCME au sein du CEA

L'organigramme de la Figure 3 positionne le LCME au sein du CEA.
C'est au sein de cette équipe qu'a eut lieu mon projet de fin d'études.

1.1.1. Pôle Recherche Technologique

Le Pôle Recherche Technologique est créé en janvier 2001. Ses missions fondamentales sont :

- Mettre en oeuvre des plates-formes partenariales d'innovation ouvertes sur l'extérieur et permettant de favoriser la création d'une forte culture technologique mêlant la recherche amont, la recherche appliquée et la valorisation industrielle ;
- Identifier et développer les nouvelles technologies de l'information et de la communication, qui répondent aux attentes des industriels en améliorant leur compétitivité, dans les domaines des micro et nano technologies et des systèmes à logiciel prépondérant ;
- Identifier et développer, en collaboration avec les autres pôles, les nouveaux matériaux et procédés et les nouvelles technologies pour l'énergie et l'environnement en pilotant les actions de développement et de partenariat industriel ;
- Développer avec les industriels les actions de partenariat et de valorisation des connaissances et des savoir-faire acquis par la DRT dans ses domaines de compétences, et avec les PME/PMI la diffusion des technologies développées par l'ensemble du CEA.

1.1.2. LIST

Situé en Île de France sud (Saclay et Fontenay aux Roses), le Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies est un centre de recherche technologique sur les systèmes à logiciel prépondérant organisé selon trois thématiques présentant de forts enjeux sociétaux et économiques :

- les Systèmes Embarqués (architectures et conception de systèmes, méthodes et outils pour la sûreté des logiciels et des systèmes, systèmes de vision intelligents),
- les Systèmes Interactifs (ingénierie de la connaissance, robotique, réalité virtuelle et interfaces sensorielles),
- les Capteurs et le traitement du signal (instrumentation et métrologie des rayonnements ionisants, capteurs à fibre optique, contrôle non destructif).

Le List c'est aussi :

- 300 chercheurs, dont 70 doctorants et post-doctorants,
- un budget de 33 M€,
- 112 brevets actifs (19 dépôts dans l'année),
- 21 logiciels déposés à l'Agence pour la Protection des Programmes (APP),
- 59 licences actives.



1.1.3. DETECS

Le Département des Technologies du Capteur et du Signal regroupe 3 services :

- l'Unité des Technologies de l'Assemblage,
- le Service SYstème et Simulation pour la Surveillance et le Contrôle,
- et le Service d'Elaboration et de Mise en Forme des Matériaux.

Le LCME fait partie du Service SYstème et Simulation pour la Surveillance et le Contrôle.

1.1.4. LCME

L'effectif du LCME est de 7 permanents (ingénieurs et techniciens), 4 thésards et 1 post-doctorant.

Son activité spécifique est le Contrôle Non Destructif (CND) par Courants de Foucault (CF). Il a pour objectif principal de développer des moyens de simulation du CND-CF, des capteurs et des méthodes de contrôle.

Dans cette optique, les activités du LCME sont :

- le développement de méthodes et de capteurs ;
- le traitement d'informations (signaux, images) ;
- le développement du logiciel de simulation CIVA (module courants de Foucault) ;
- l'étude du vieillissement des matériaux.

Une part importante du budget provient de contrats de recherche avec des partenaires industriels (EDF, Framatome, Intercontrôle, EADS, AIRBUS...).

1.2. EDF

Dans un contexte d'ouverture des marchés de l'énergie, le groupe EDF a pour ambition de devenir un énergéticien de référence en Europe et présent dans le monde.

Le groupe EDF est un des leaders de la production, de la distribution et de la commercialisation d'électricité en Europe. Il gère un parc de production d'une capacité de 125,4 GWe. Il fournit énergies et services à 42,1 millions de clients dans le monde dont 36,2 millions en Europe.

Le groupe EDF est constitué d'Electricité de France (EDF) et d'un réseau de filiales européennes et de sociétés implantées dans le monde.

EDF et les sociétés du Groupe exercent des activités centrées sur les métiers de l'énergie : production, négoce, transport, distribution, commercialisation et services.

Le groupe EDF est engagé dans une stratégie de performance rentable et responsable qui allie performance économique, équité sociale et responsabilité environnementale.

En 2004, le groupe EDF a réalisé un chiffre d'affaires consolidé de 46,9 milliards d'euros.

1.2.1. L'organisation

Par décret publié au Journal Officiel, le 19 novembre 2004, EDF est devenue une société anonyme. A cette occasion, Pierre Gadonneix, Président-Directeur Général d'EDF a mis en place une nouvelle organisation et élargi le comité exécutif aux grands métiers du Groupe et à sa dimension internationale. Le comité exécutif d'EDF compte 9 membres.



Figure 4 : Organigramme EDF

1.2.2. EDF R&D

L'organigramme suivant présente l'organisation de la division R&D de laquelle Yves Bamberger est le directeur.

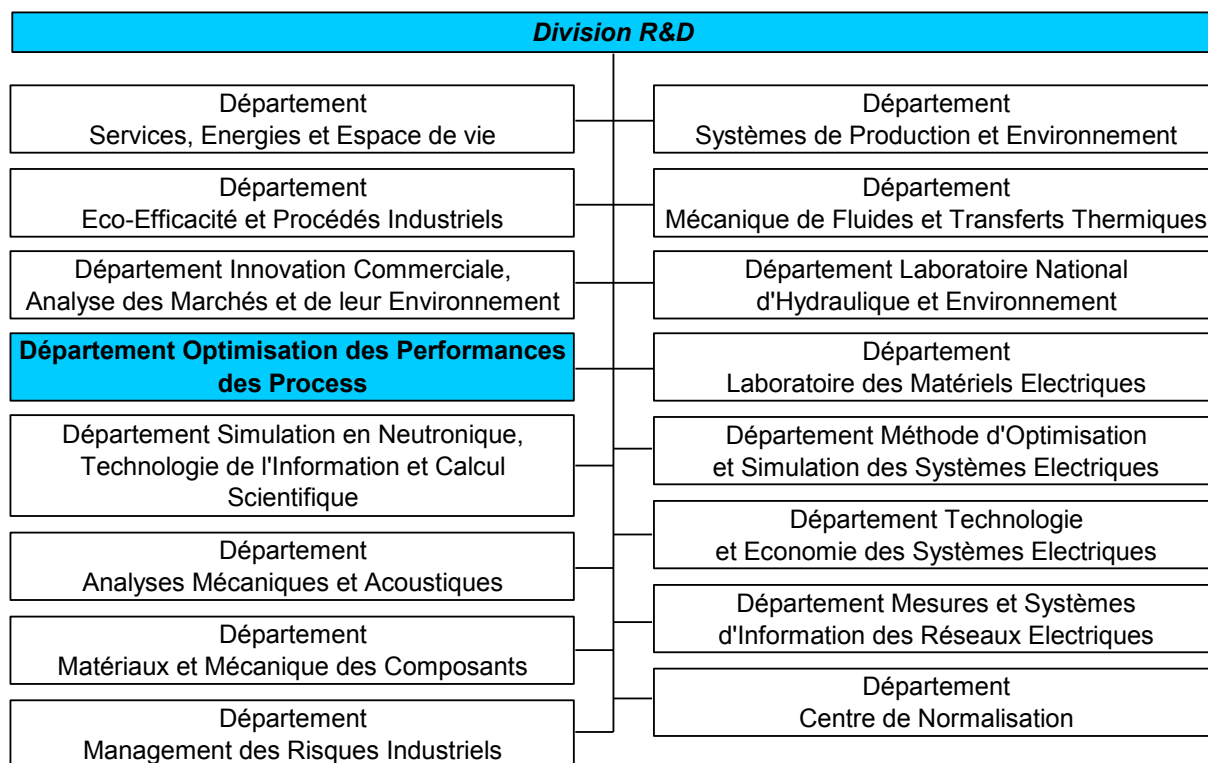


Figure 5 : Organigramme de la division R&D

Le département OPP se compose de 5 groupes :

- P1A : Contrôle Commande,
- P1B : Systèmes Dynamiques et Traitement du Signal,
- P1C : Fonctionnement et Conduite,
- P1D : Systèmes d'Information et de Surveillance,
- **P1E : Mesures Physiques et Radioprotection.**

Gauthier VERCOUTERE fait partie des 26 agents du groupe P1E, Claire LAURENT est le chef du groupe.

EDF organise son programme de recherche suivant cinq domaines :

• Production

Les trois branches traditionnelles de la production d'électricité - hydraulique, thermique à flamme et nucléaire - font l'objet de recherches permanentes afin de rationaliser toujours davantage l'exploitation et la maintenance des sites de production d'énergie. Les ouvrages de production bénéficient ainsi des avancées technologiques les plus à même d'augmenter les performances tout en minimisant l'impact environnemental.

La prospective R&D se focalise également sur les énergies renouvelables, de l'éolien à la biomasse en passant par le solaire ou les courants marins. Plus de 50 millions d'euros sont consacrés, sur 5 ans, à ce programme.

La « production répartie », est aussi un axe de recherche. Industriels, collectivités locales, grosses entreprises deviennent ainsi acteurs de la production d'énergie en développant leurs propres solutions énergétiques.

La R&D d'EDF travaille également à anticiper le besoin en énergies.

• Développement commercial

Proposer de nouveaux services, améliorer la qualité des prestations pour satisfaire les utilisateurs, tels sont les enjeux de la nouvelle donne économique pour EDF.

EDF R&D travaille aussi à initier de nouveaux axes de prospection clients en proposant notamment davantage de conseil, des fonctions transversales comme des solutions logistiques et des outils logiciels de maintenance.

· Réseaux

L'amélioration du réseau de distribution et de transport est une priorité : pérennisation du patrimoine mais aussi réduction du nombre de centres stratégiques de conduite, augmentation de la capacité de transport...

De nouveaux matériaux, comme la fibre de carbone, permettent par exemple d'optimiser la charge supportée par les conducteurs et autorisent une gestion plus économique des infrastructures.

D'autres travaux de recherche portent sur les meilleures solutions d'enfouissement des lignes électriques.

· Environnement

La performance environnementale d'EDF vis-à-vis de l'effet de serre est démontrée par l'analyse du cycle de vie du kWh des 5 filières de production (nucléaire, hydraulique, charbon, fioul, gaz).

EDF R&D a fait le choix du développement durable et mène ainsi plusieurs actions dans ce sens :

- Évaluation des techniques de gestion des combustibles nucléaires usés (entreposage, stockage, incinération).
- En appui au programme ACCESS, expérience pilote d'électrification dans un village de 1600 habitants, dans la province de Xinjiang en Chine, menée avec l'Institut des Énergies Renouvelables de Xinjiang.
- Hydrauliques et cellules photovoltaïques à couche mince : de nouvelles voies pour les énergies renouvelables.
- Dans le cadre du projet "Ville durable", expertise développée pour établir des bilans économiques de CO₂ à l'échelle d'un territoire.
- Transports collectifs urbains alimentés sans caténaire (tramways, tram/train,) : évaluation technico-économique du stockage tampon par supercondensateur.

· Technologie de l'information

Les Technologies de l'information irriguent depuis longtemps déjà tous les métiers du Groupe EDF où elles sont devenues un outil essentiel de création de valeur. Elles constituent aujourd'hui une condition indispensable à la réussite des processus stratégiques, qu'il s'agisse de la production, de la commercialisation, du développement.

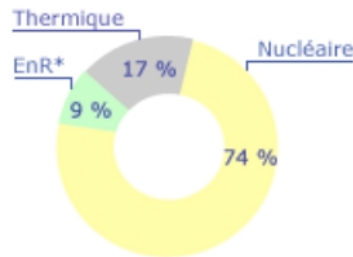
Les activités spécifiques d'EDF R&D, qui représentent un investissement d'environ 10 MEuros par an répondent ainsi à trois enjeux :

- Performance de la simulation : il s'agit d'offrir les nouveaux moyens informatiques permettant d'aborder de nouveaux champs de la simulation des phénomènes physiques ou économiques de notre métier d'énergéticien. Ainsi, nous mettons en place les moyens de calcul scientifique haute performance et de visualisation nécessaire à l'exploration de nouveaux domaines de la physique.
- Identifier de nouveaux potentiels de performance et de développement : il s'agit de mener, pour le compte des domaines métiers, l'évaluation du potentiel offert par les nouvelles technologies. Par exemple, nous évaluons et expérimentons l'usage de technologies sans fil pour les commerciaux d'EDF.
- Garantir la qualité et la performance du SI Groupe : il s'agit d'obtenir de notre Système d'Information le meilleur rapport Performance/Coût. Ainsi, nous définissons les futurs réseaux informatiques nervurant toujours plus l'entreprise.

1.2.3. Chiffres-clés

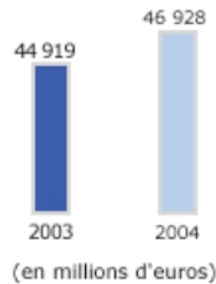
En 2004, EDF compte :

- **42,6 millions de clients** dans le monde dont 36,2 en Europe,
- **125,4 GWe** de capacité de production électrique dans le monde (hydraulique, thermique, nucléaire, éolien, solaire, géothermique),
- **46,9 milliards d'euros** de chiffre d'affaires en 2004,
- **44,9 milliards d'euros** de chiffre d'affaires en 2003,
- **161 310 salariés** dans le monde.



(*EnR : Energies renouvelables)

Figure 6 : Production d'électricité en 2004 : 610 TWh



croissance de 4,5 % du
chiffre d'affaires en 2004.

Figure 7 : Evolution du chiffre d'affaires entre 2003 et 2004

EDF a consacré en 2003 un budget de 431 millions d'euros pour ses activités Recherche et Développement.

La répartition par domaine de recherche est la suivante :

- Nucléaire : 44 % (dont 14 % pour partenariat CEA)
- Commercial : 20 %
- Réseaux électriques et environnement : 16 %
- Hydraulique et optimisation des actifs : 6 %
- Thermique à flamme : 3 %
- Les domaines transverses de recherche (dont Technologies de l'information) représentent 11 % du budget.

1.3. Partenariat

Un nouvel accord tripartite CEA, EDF, Framatome ANP offre depuis début 2001 un nouveau cadre contractuel pour ces collaborations.

Depuis de nombreuses années, EDF fait appel aux moyens et aux compétences du CEA dans le domaine de la recherche et développement pour le nucléaire.

Cet accord permet en particulier un accès privilégié à chaque partenaire au réacteur expérimental OSIRIS ainsi qu'aux laboratoires associés (le LECI à Saclay et le LECA-STAR à Cadarache).

Il traite des applications pour le nucléaire industriel.

Les travaux menés dans le cadre de cet accord tripartite se structurent en trois comités de programmes, chacun segmenté en Groupes de Gestion de Projet étroitement coordonnés avec les structures internes de pilotage de la R&D.

Le Comité de Programmes Chaudière comprend les actions de R&D dans le domaine de la durée de vie, du dimensionnement et des performances des matériels, du contrôle-commande, de l'environnement et de la sûreté (dont la thermohydraulique accidentelle).

Le Comité de Programmes Combustible concerne les actions de R&D en soutien aux futures gestions cœur-combustible qui nécessitent la réalisation de nombreux essais dans le réacteur OSIRIS.

Enfin, le Comité de Programmes Préparation du Futur s'intéresse aux concepts de réacteurs nucléaires du futur (HTR, réacteurs à sel fondus...), aux innovations dans le domaine des réacteurs à eau ainsi qu'à la réalisation, en co-développement CEA-EDF, des nouvelles générations de codes de calcul.

2. Problématique du projet

Le sujet d'étude proposé par EDF R&D est consultable à l'annexe 1.

2.1. Contexte

Le document [3] présente, la problématique du contrôle et l'état de l'art des techniques de CND.

Le circuit SEC (Eau Brute Secourue) a pour fonction d'assurer le refroidissement du circuit RRI (Réfrigération Intermédiaire) des centrales nucléaires à eau pressurisée au moyen de la source froide : mer ou rivière. Ce circuit étant classé **Important Pour la Sécurité (IPS)**, il doit répondre à un certain nombre d'exigences, dont notamment :

- L'étanchéité de conduites d'amenée d'eau de 600 mm de diamètre (constituées d'un tube métallique - l'âme en tôle - enrobé de béton) ;
- La résistance au séisme de l'infrastructure dont la stabilité mécanique repose pour moitié sur l'âme tôle, et pour moitié sur les armatures métalliques noyées dans le revêtement externe en béton de la conduite.

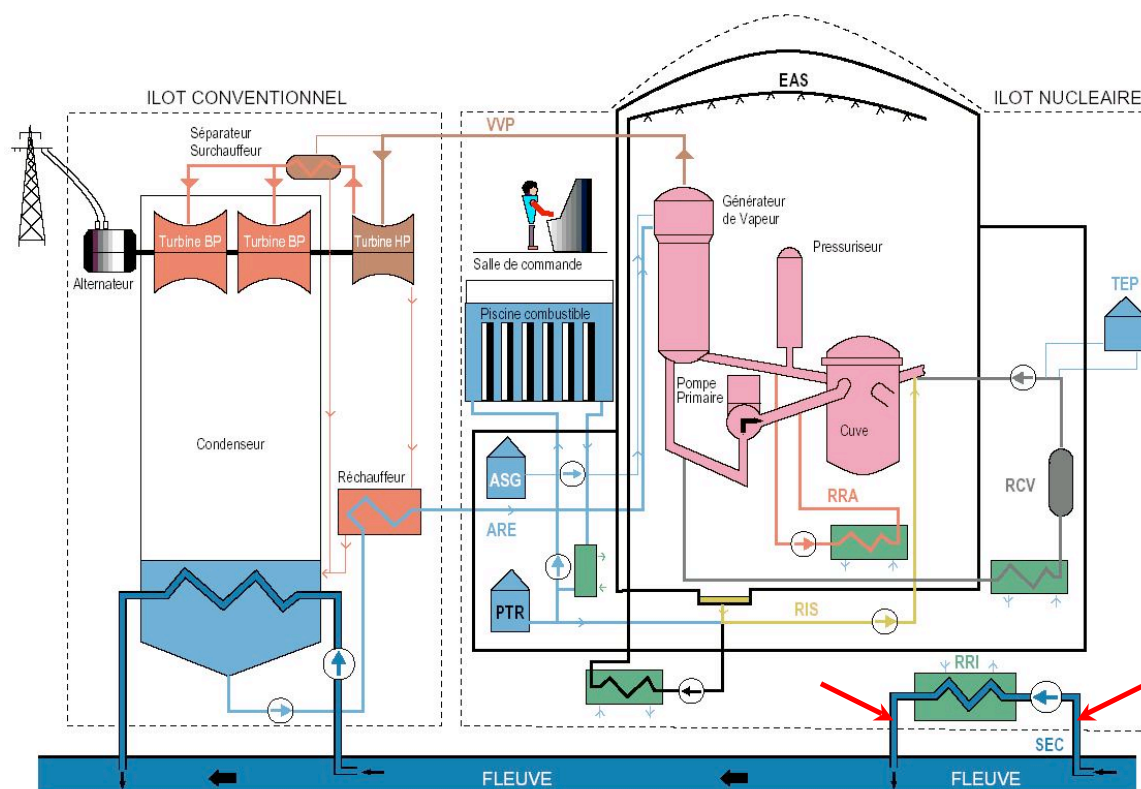


Figure 8 : Schéma de fonctionnement d'un CNPE nucléaire

Pour satisfaire ces exigences, EDF souhaite disposer d'une méthode d'investigation qui permette de diagnostiquer l'état de ces conduites de manière non destructive. L'objectif industriel est de déceler au plus tôt les zones affectées par la corrosion, de manière à pouvoir mettre en œuvre une stratégie de maintenance optimisée du réseau de conduites. La corrosion des conduites concerne surtout les centrales de bord de mer.

L'enjeu économique est de pouvoir juger techniquement si le remplacement de ces conduites (par des conduites en composite ne présentant pas de sensibilité à la corrosion) doit avoir lieu à la prochaine Visite Décennale des sites concernés. S'il peut attendre, le report de l'investissement permettrait de réaliser une économie de plusieurs millions d'euros.

Dans ce contexte, EDF R&D a entrepris de recenser les méthodes de mesure disponibles industriellement. Un plot d'essais a été réalisé afin de pouvoir évaluer les performances des techniques d'auscultation disponibles sur le marché. En particulier, les techniques basées sur les courants de Foucault ont été tout particulièrement regardées pour détecter et caractériser les pertes d'épaisseur de métal. Les essais d'évaluation réalisés ont montré que les méthodes et outils disponibles sur le marché ne sont pas adaptés pour fournir ces informations.

Le projet DURO GC (**D**URabilité des **O**uvrages de **G**énie **C**ivil) comporte notamment le lot Corrosion des aciers dans le béton qui vise à étudier la faisabilité d'une méthode de mesure physique électromagnétique pour déterminer la réduction d'épaisseur d'une tôle en acier enrobée.

2.2. Données techniques de la problématique

Une recherche auprès de la société BONNA SABLA ([4], [5] et annexe 2) a permis de regrouper les informations techniques suivantes.

Une conduite BONNA âme tôle moulé (ATM) est constituée de deux matériaux : acier et béton.

- L'acier est utilisé :
 1. pour la réalisation d'une paroi cylindrique étanche. Le procédé de fabrication consiste à enrouler et souder hélicoïdalement une bande d'acier⁴ (d'épaisseur nominale : 2 mm) ;

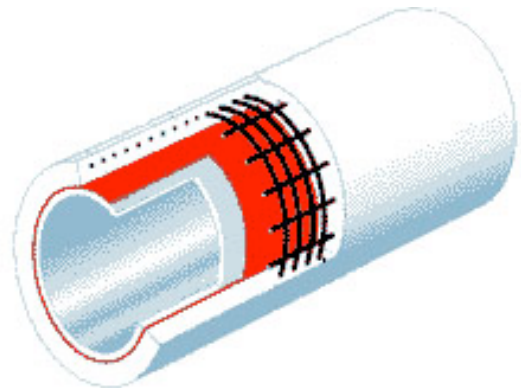
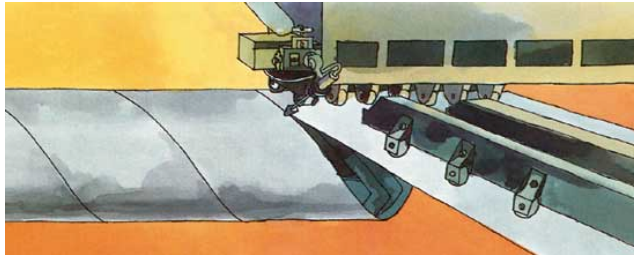


Figure 9 : Fabrication et structure d'une conduite BONNA âme tôle

2. pour former l'armature de la couche extérieure de béton. Il s'agit d'un "fil" de 6 mm de diamètre enroulé sous la forme d'une spirale autour de l'âme d'acier et de douze fils longitudinaux (génératrices), régulièrement répartis sur la circonférence. La spirale et les génératrices sont soudés⁵.

- Le béton est utilisé en couche interne et externe de la conduite.

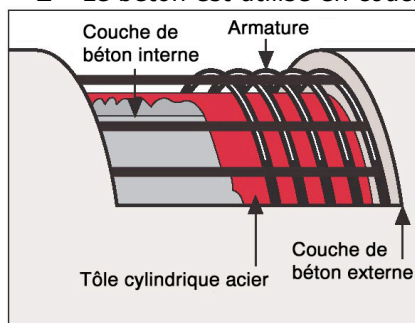


Figure 10 : Vue détaillée de la structure d'une conduite BONNA

D'après la documentation BONNA [5] :

La "surface intérieure" riche en ciment et très lisse confère à la canalisation un coefficient d'écoulement hydraulique excellent et permanent.

L'âme en tôle garantit l'étanchéité absolue et immédiate de la conduite et participe à la résistance aux charges.

Les spires assurent la résistance aux charges extérieures et à la pression intérieure.

Les parois de béton extérieures protègent définitivement les aciers contre la corrosion et participent à la résistance.

Les données dimensionnelles sont repérées sur le schéma en coupe de la Figure 11.

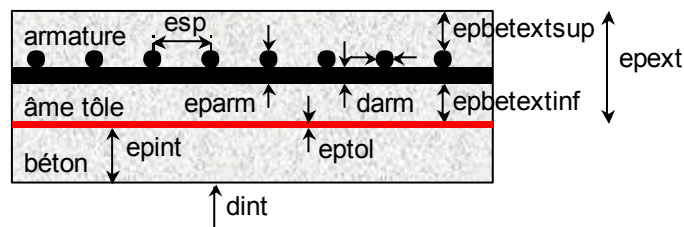


Figure 11 : Repérage des données dimensionnelles

⁴ La nuance de l'acier constitutif de l'âme tôle dont l'épaisseur est à déterminer est E24-2.

Table de correspondance des nuances des aciers suivant le document [15] :

| | Europe | | France | International | USA |
|--------|-------------|--------------|------------|---------------|---------------|
| Norme | EN10025(93) | EN10025(90) | NFA 35-501 | ISO 630 | ASTM |
| Nuance | S235JR(G2) | Fe E360B(FN) | E24-2 | Fe 360 B | A284 gr. C, D |

⁵ La soudure entre spires et génératrices est une simple soudure électrique (court-circuit entre les deux phases) par fusion du métal.

Les valeurs nominales et mesurées sont les suivantes :

| Paramètre mesuré | Repère | Valeur nominale (mm) | Mesure ⁶ (mm) |
|----------------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|
| Épaisseur de l'âme tôle | Eptol | 2 | - |
| Diamètre du fil de l'armature | Darm | 6 | 7,0 |
| Espacement entre spire | esp | 20 | - |
| Espacement entre génératrice | espgen | 180 | - |
| Épaisseur de l'armature (2 fils) | eparm | 12 | - |
| Épaisseur interne de béton | epint | 22 | 25,6 |
| Épaisseur de béton sous armature | epbetextinf | - | 4,6 |
| Épaisseur de béton sur armature | epbetextsup | - | 16,9 |
| Épaisseur externe de béton | epext | 36 | 35,8 |
| Diamètre interne de la conduite | dint | 600 | - |
| Diamètre externe de la conduite | dext | 730 | - |

Tableau 1 : Paramètres dimensionnels de la conduite BONNA

La perméabilité relative et la conductivité moyennes retenues pour les simulations sont les suivantes :

$$\mu_r = 1000 ; \sigma = 6.10^6 S.m^{-1}$$

Ces valeurs sont issues des documents [6] et [7] confirmées par l'expertise du LCME.

2.3. Objectif et perspective du projet de fin d'études

Le but du projet de fin d'études est donc de concevoir un dispositif prototype de contrôle par courants de Foucault qui soit adapté à l'auscultation des conduites BONNA à âme tôle installées sur les sites d'EDF, en s'appuyant sur la méthodologie appliquée en CND des matériaux métalliques (tubes de générateurs de vapeurs par exemple).

L'étude comporte plusieurs étapes :

- Conception du dispositif de contrôle au moyen de modélisations par le code CIVA-CF⁷ ;
- Evaluation de la faisabilité expérimentale (essais réalisés en laboratoire) ;
- Estimation du coût de réalisation d'un prototype ;
- Validation expérimentale du dispositif de contrôle en laboratoire ;
- Essais sur conduites réelles et sur site ;
- Industrialisation.

⁶ La mesure est le résultat de la moyenne de 12 mesures réalisées au niveau des 12 armatures longitudinales (génératrices).

⁷ Ce code de calcul de contrôle non destructif par Courants de Foucault est développé par le LCME.

3. Recherche documentaire

La recherche documentaire a permis de recenser les documents apportant des informations susceptibles de permettre la résolution de la problématique EDF de contrôle des conduites BONNA.

Cette recherche s'est appuyée sur la base EDF, le dossier d'affaire existant, auprès du LCME, de BONNA SABLA et Internet. Elle a permis de constituer une base de connaissances des techniques actuelles concernant le CND par CF et la mesure d'épaisseur à travers revêtement.

3.1. Bibliographie EDF

La base documentaire Galaxie d'EDF regroupe les notes émises par les agents EDF. Cette base a été consultée en utilisant les mots clés : courants, Foucault, électromagnétique, mesure, épaisseur.

Le dossier d'affaire déjà existant m'a permis de prendre connaissance du problème à traiter et des données et essais disponibles et réalisés [8] et [9].

3.2. Bibliographie CEA

Le LCME étudie et développe depuis 30 ans des capteurs à Courants de Foucault. De nombreux documents [10] m'ont permis de me familiariser avec le domaine du CND au moyen de CF.

La principale application est la détection de défauts (fissures essentiellement) dans des pièces conductrices. Un exemple souvent cité est le contrôle des tubes des générateurs de vapeur des REP⁸ au moyen de sondes cylindriques à CF.

Quelques documents traitent du diagnostic des armatures des conduites ATM [12] ou de poutre en béton précontraint [11]. L'article [13] présente l'état de l'art dans le domaine des capteurs électromagnétiques.


3.3. Bibliographie BONNA SABLA

La société BONNA SABLA a fourni un catalogue de produits dans lequel est présentée la conduite âme tôle ainsi que ses caractéristiques nominales en terme de dimensions et de matériaux utilisés.

Un contact téléphonique a également été établi avec M. LAFON pour clarifier certains points du guide et mieux comprendre les étapes de fabrication.

Le revêtement béton intérieur est mis en place par centrifugation. Le revêtement extérieur est quant à lui moulé à la verticale. Lors de ce moulage, l'ensemble est mis en vibration à haute fréquence afin de garantir un bon écoulement du béton autour des armatures et ainsi éviter la présence de bulles d'air. Les conduites vendues à ce jour ont vu l'épaisseur du revêtement extérieur augmenter de 5 mm (passage de 36 à 41 mm) pour garantir le recouvrement plus complet de l'acier.

3.4. Internet

Le moteur de recherche sur Internet  a été retenu pour effectuer la prospection. Les mots clés utilisés sont les mêmes que ceux utilisés au § 3.1 plus : Eddy, currents, magnetic, measure, thickness, permeability, conductivity, concrete.

La recherche sur Internet de documents traitant de CF a été riche en données.

La société Sciensoria effectue des mesures d'épaisseur des tôles métalliques minces au moyen de CF et utilise des appareils bi-fréquence. Cependant les épaisseurs mesurées sont de l'ordre de la centaine de microns.

La revue *sensors and actuators* publie un article [12] traitant d'un système portable capable de réaliser la cartographie des armatures de béton armé.

Le capteur utilisé est un capteur constitué de trois bobines :

- une bobine d'excitation,
- une bobine de mesure,
- une bobine de compensation.

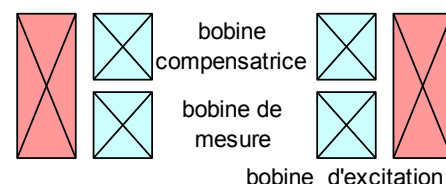


Figure 12 : Schéma en coupe d'un capteur à 3 bobines

Un tel capteur a été utilisé dans une première série d'essais visant également à une familiarisation avec instruments et techniques de la mesure au moyen de CF. Les résultats n'ont pas été concluants.

⁸ Réacteur à Eau sous Pression.

3.5. **Bilan de la recherche**

De nombreux documents ont été recensés mentionnant l'utilisation de capteurs basés sur les CF pour le contrôle de pièces.

Plusieurs types de contrôles au moyen de CF ont été recensés :

CF en champ lointain (**R**emote **F**ield **E**ddy **C**urrents),

- Les RFEC sont souvent utilisés pour le contrôle de produits tubulaires conducteurs d'électricité,

Cette méthode ne convient pas dans notre cas puisqu'elle implique un accès à la conduite par l'intérieur pour réaliser l'inspection.

De plus, l'armature du béton perturbe l'induction magnétique secondaire (lignes de champ s'épanouissant à l'extérieur de la conduite).

- CF pulsés (génération de trains d'impulsions),

Le contrôle au moyen de CF pulsés n'est pas étudié ici mais n'est pas écarté pour autant. Il pourrait également apporter une solution. L'analyse des signaux est cependant plus complexe qu'en CF "classiques".

- CF "classiques" (basse fréquence).

La majeure partie des contrôles se fait suivant ce mode. C'est le cas qui nous concerne. La fréquence utilisée pour la mesure de l'épaisseur est de 10 Hz.

Aucun capteur satisfaisant à notre besoin n'a été trouvé lors de la recherche documentaire.

La présence de l'armature est un inconvénient important qui perturbe les lignes de champ et empêche l'utilisation de bobines de grande dimension.

La "bibliothèque" de capteurs et le savoir-faire du LCME ont permis d'identifier le fluxgate comme un capteur prometteur pour résoudre la problématique.

4. Le Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault

4.1. Rappel du principe des courants de Foucault

Lorsqu'on déplace un objet conducteur par rapport à un aimant ou à un électroaimant, ou s'il est immobile et soumis à une variation de champ magnétique, des courants électriques sont induits dans la masse du conducteur.

C'est le phénomène d'induction, découvert en 1831 par Michael Faraday (1791-1867).

Toute variation de flux magnétique traversant la masse métallique produit des courants de Foucault. Leur distribution et leur répartition dépendent du champ magnétique d'excitation (fréquence, intensité), de la géométrie (épaisseur, distance pièce-exciteur, présence de défauts) et des caractéristiques de conductivité électrique et de perméabilité magnétique de la structure examinée.

Ces courants créent eux-mêmes un champ magnétique qui, interagissant avec celui de l'aimant, s'oppose au déplacement⁹ ou à l'excitation. La tradition française les nomme "courants de Foucault" ; Eddy currents en anglais. L'effet des courants de Foucault sur un conducteur mobile est de freiner efficacement son mouvement. Si l'on veut maintenir ce mouvement, le travail dépensé par l'opérateur est transformé en chaleur, produite par l'effet Joule.

Exemple : un disque de cuivre tourne entre les pôles d'un électro-aimant.

1. Si l'électro-aimant n'est pas parcouru par un courant, le disque tourne librement,
2. Si l'électro-aimant est parcouru par un courant, le disque est freiné et s'échauffe.

c.f. : [16] et [17].

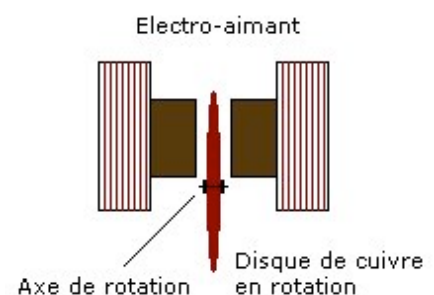


Figure 13 : Freinage par induction

Les applications sont nombreuses :

- détection de défauts dans des pièces métalliques (suivi d'installations et de matériels en service ou en sortie de fabrication), c'est le **Contrôle Non Destructif**,
- classification de particules solides selon leurs propriétés magnétiques,
- contrôle d'épaisseur (CND),
- contrôle de soudure (CND),
- freinage des poids lourds,
- détection de véhicule à un feu tricolore,
- four à induction,
- plaque de cuisson,
- ...

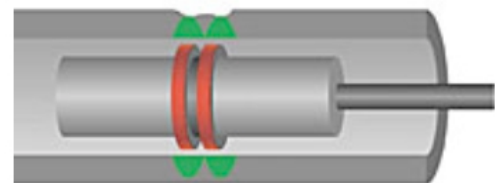


Figure 14 : Inspection d'un tube (sonde interne)

4.2. Le CND

Le **Contrôle Non Destructif** par **Courants de Foucault** est une méthode électromagnétique d'inspection de pièces métalliques.

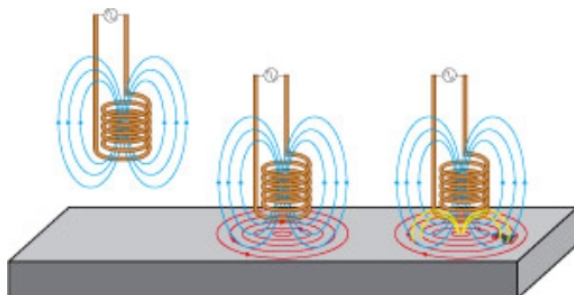


Figure 15 : Induction de CF dans une plaque métallique

Elle repose sur une fonction *excitation* par un courant électrique variable parcourant un inducteur, en général une bobine, placée au voisinage de la pièce à contrôler y induisant des courants et une fonction *réception* par un dispositif, en général une bobine (distincte ou confondue avec la première). Les perturbations de ces courants provoquées par un écart à une situation de référence (présence d'un défaut, variations dimensionnelles, inhomogénéité de composition...) sont mesurées et interprétées. Cette méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs de l'électricité.

⁹ Loi de Faraday-Lenz : le courant induit a un sens tel qu'il tend, par ses effets, à s'opposer à la cause qui le crée.

4.3. L'effet de peau

La pénétration d'une onde plane dans un demi-espace infini et homogène suit une atténuation en amplitude exponentielle de la forme :

$$A(z) = A_0 \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \text{ où } \delta \text{ est la profondeur.}$$

Par extension, pour les applications de CND, pour lesquelles la configuration est différente de l'onde plane, δ est utilisé pour estimer la profondeur de pénétration standard.

La profondeur de pénétration standard des CF peut être évaluée par la relation :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

où :

- δ est la profondeur de pénétration standard définie comme la profondeur pour laquelle la densité du courant est divisée par e par rapport à la densité du courant en surface et le signal subit un retard de phase de 1 radian (pour un demi-espace infini conducteur excité par une nappe de courant plane infinie),
- f la fréquence d'excitation du capteur,
- μ la perméabilité magnétique,
- σ la conductivité électrique.

La profondeur de pénétration standard diminue lorsque f et/ou μ et/ou σ augmente(nt).

Les valeurs de μ et de σ sont imposées par la conduite en acier. Le seul paramètre permettant de fixer δ est alors la fréquence f .

La fréquence retenue pour les essais réalisés au moyen du capteur fluxgate est $f=10$ Hz.

A $f=10$ Hz, la profondeur de pénétration standard est de 2,05 mm.

- ☐ A $z=\delta$, l'amplitude a chuté à 36,8 %,
 - ☐ A $z=2\delta$, l'amplitude a chuté à 13,5 %,
 - ☐ A $z=3\delta$, l'amplitude a chuté à 5 %.

- ☐ A $z=\delta$, le déphasage atteint 57° ,
 - ☐ A $z=2\delta$, le déphasage atteint 114° .

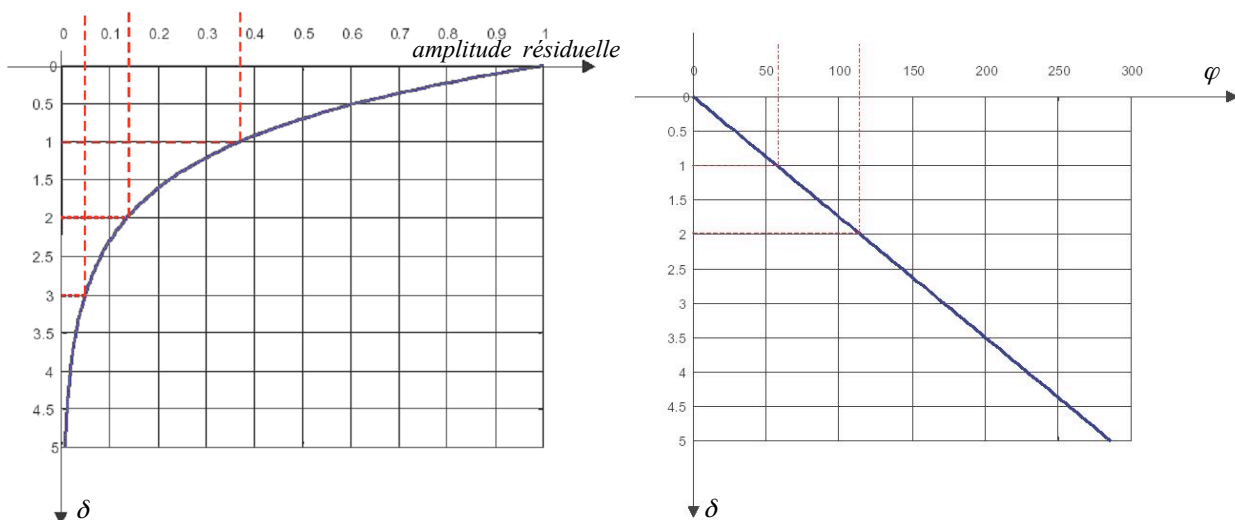


Figure 16 : Effet de peau – variation de l'amplitude et de la phase

5. Simulation numérique

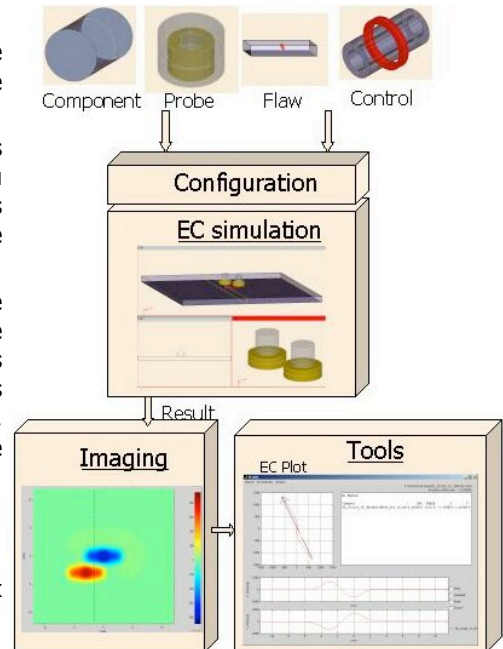
5.1. Le code de calcul CIVA

Le logiciel CIVA [18] est une plate-forme d'expertise pour le contrôle non destructif constituée d'un ensemble de modules de lecture, de visualisation de traitement et de simulation.

CIVA possède deux modules :

- US (permet de calculer le champ ultrasonore rayonné par un transducteur ultrasonore dans le composant à inspecter),
- CF (permet de calculer les variations d'impédance aux bornes d'un capteur absolu ou différentiel, la densité des courants induits et leur répartition, le champ électrique, et le potentiel vecteur)

CIVA permet de lire et de visualiser différents formats de fichiers de données. Les outils d'imagerie et d'analyse de CIVA permettent de manipuler et de traiter les données ultrasonores et électromagnétiques. Les mêmes outils d'imagerie pouvant être utilisés sur des données simulées, CIVA permet une comparaison directe et aisée entre expérience et modélisation.



5.2. Dispositifs simulés

Le LCME dispose, au sein de son laboratoire, de nombreux capteurs.

Entre autres :

1. Le capteur le plus simple est une bobine jouant à la fois le rôle de l'excitateur et du récepteur. On parle de fonction commune.
2. Plusieurs bobines peuvent ensuite être utilisées : une bobine d'excitation, une bobine de mesure et éventuellement une bobine de compensation. C'est le cas du capteur repéré "CM3".
3. La bobine de mesure peut être remplacée par un élément sensible comme c'est le cas du capteur dont le principe est décrit au chapitre 6.1 : le fluxgate. Il permet la mesure locale de l'induction magnétique. Le rôle de l'excitation est tenu par une bobine formée par un fil de cuivre de 0,45 mm de diamètre enroulé sur 77 spires en 3 couches (les diamètres internes et externes sont respectivement de 3 et 4,25 mm et la hauteur h est de 6 mm. L'élément sensible (un microfluxgate) est situé à 20 mm de l'axe de la bobine excitatrice. Le capteur est appelé, par extension, fluxgate.

5.3. Calculs effectués

Dans un premier temps, des calculs simples ont été réalisés, à la fois pour la prise en main du code et afin d'observer si une simple bobine serait utilisable pour notre besoin.

1. Les variations d'impédance d'une bobine simple de diamètre interne 7 mm, externe 15 mm, hauteur 3,5 mm et 1400 tours ont été observées en fonction de paramètres influents.

Les paramètres influents sur la mesure sont :

- e : l'épaisseur de l'âme tôle,
- E : l'entrefer (distance capteur-tôle),
- μ_r : la perméabilité relative de la tôle,
- σ : la conductivité de la tôle,
- f : la fréquence d'excitation,
- l'armature et sa position.

Le logiciel CIVA-CF est utilisé pour réaliser les calculs de simulation afin d'observer l'influence des différents paramètres.

L'utilisation d'un tel capteur ne permet pas, d'après les simulations réalisées d'effectuer une mesure d'épaisseur d'une tôle en acier. En effet les variations du signal se font suivant la même phase qu'il s'agisse d'une modification d'entrefer ou d'épaisseur de tôle.

- Un autre capteur similaire à celui décrit par le document [11] utilisant 3 bobines, a été utilisé en simulation et en essai. Les résultats obtenus ont fait l'objet d'une réunion d'avancement. Les résultats sont appréciés dans le plan complexe, appelé aussi plan de lissajous. Ils concluent qu'un tel capteur ne convient pas non plus. En effet les variations de l'épaisseur de la tôle et de l'entrefer affectent le signal du récepteur mais suivant la même phase. On ne peut donc pas distinguer l'effet de la variation de l'épaisseur par rapport à celui de la variation d'entrefer.
- Le module *messine* du logiciel CIVA-CF est utilisé pour réaliser les calculs de simulation afin d'observer l'influence des différents paramètres sur la composante verticale de l'induction magnétique (B_z). La valeur retenue est celle se situant au niveau de l'élément sensible.

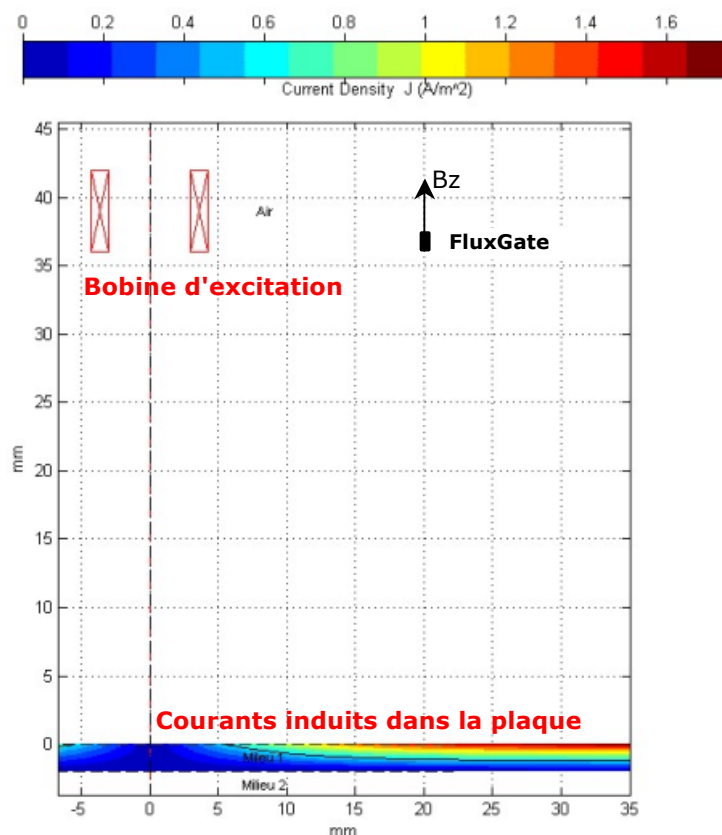


Figure 17 : Vue en coupe de l'environnement simulé par CIVA-CF *messine*

Le tableau suivant présente les valeurs des différents paramètres étudiés.

| Paramètre | Valeur nominale | Valeurs étudiées |
|----------------------------------|---------------------------------|---|
| Epaisseur de l'âme tôle | 2 mm | 0,2 / 0,5 / 0,8 / 1,5 / 2 / 2,5 / 3 (mm) |
| Entrefer | 36 mm | 25 / 30 / 35 / 36 / 40 / 45 (mm) |
| Perméabilité relative de la tôle | 1 000 | 500 / 1 000 / 1 500 / 2 000 ¹⁰ |
| Conductivité | $6 \cdot 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ | 5 / 6 / 7 ($\cdot 10^6 \text{ S.m}^{-1}$) |
| Position de l'armature | Non simulée | Non simulée |
| Fréquence d'excitation | - | 10 / 5 000 (Hz) |

Tableau 2 : Valeurs étudiées des paramètres dimensionnels

Les valeurs étudiées sont choisies telles qu'elles puissent être représentatives de la réalité.

¹⁰ Perméabilité maximale observée : [7].

5.4. Résultats de simulation

Seuls les résultats de simulation concernant le fluxgate et ne tenant pas compte de l'armature sont présentés. Toutes les courbes sont observées sur le plan complexe (de Lissajous).

□ Influence de l'épaisseur e et de l'entrefer E

μ_r et σ sont, dans un premier temps, considérés invariants.

Les tableaux suivants montrent les configurations simulées.

| Épaisseur de tôle e (mm) | Entrefer E (mm) |
|----------------------------|-------------------|
| 0,5 | 25 |
| 0,8 | 30 |
| 1,5 | 35 |
| 2 | 36 |
| 3 | 40 |

Tableau 3 : Valeurs de e et E étudiées en simulation

Les influences de l'épaisseur e et de l'entrefer E , sont observées sur la figure suivante.

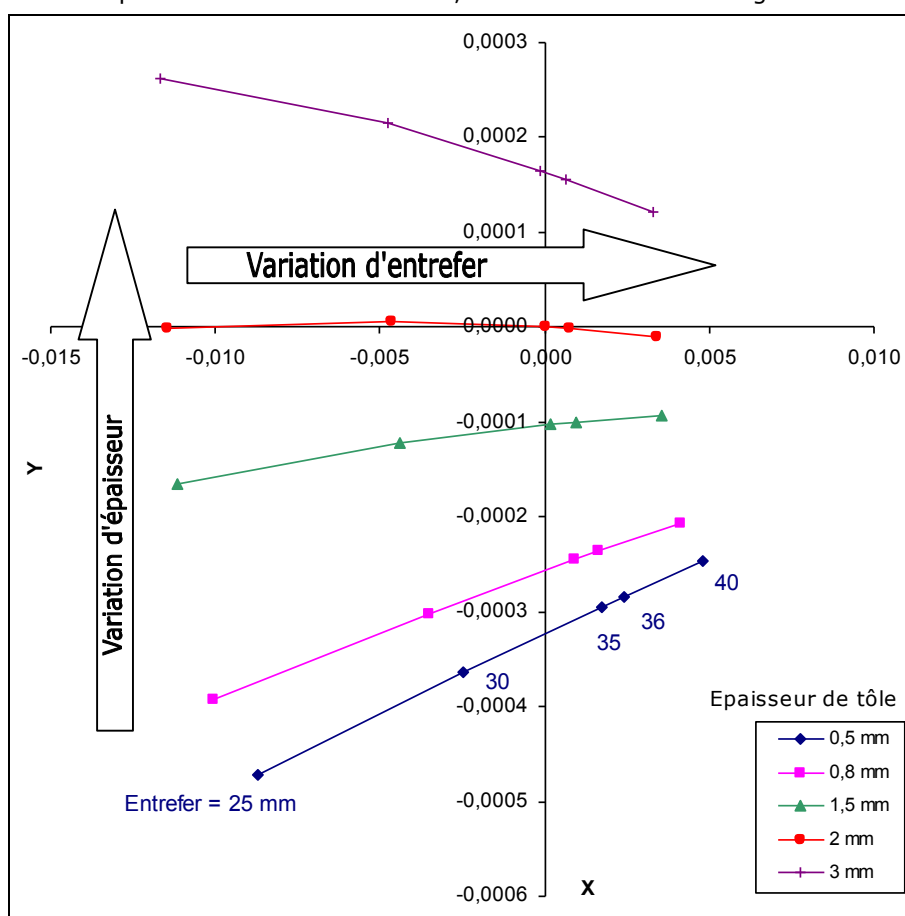


Figure 18 : B_z (μT) fonction de l'épaisseur résiduelle e et de l'entrefer E à 10 Hz

Chaque courbe représente une épaisseur de tôle et chaque point sur une courbe un entrefer différent.

L'influence de l'épaisseur et de l'entrefer sur le signal se fait suivant 2 phases différentes. Cette condition est nécessaire. Autrement, les influences des deux paramètres sur le signal ne peuvent pas être différenciées. La différence de phase est même très bonne puisque proche de 90° .

Cependant, la variation du signal suivant Y est 28 dB plus faible que suivant X .

Remarques : Toutes les valeurs sont recalées de façon à ce que le point correspondant à $e=2$ mm et $E=35$ mm soit à $O(0; 0)$ et que le point correspondant à $e=2$ mm et $E=25$ mm soit sur l'axe des abscisses ; ceci afin de pouvoir comparer plus facilement toutes les simulations effectuées et les essais. Toutes les courbes se rejoignent à une distance (Entrefer) infinie de la plaque ; son épaisseur n'influence plus le calcul.

□ Influence de la conductivité σ et de la perméabilité relative μ_r

Les tableaux suivant montre les configurations simulées.

| σ ($\cdot 10^6 \text{ S.m}^{-1}$) | μ_r |
|--|---------|
| 5 | 500 |
| 6 | 1 000 |
| 7 | 1 500 |
| | 2 000 |

Tableau 4 : Valeurs de σ et μ_r étudiées en simulation

Le graphique suivant présente les résultats de simulation de l'influence des paramètres σ et μ_r .

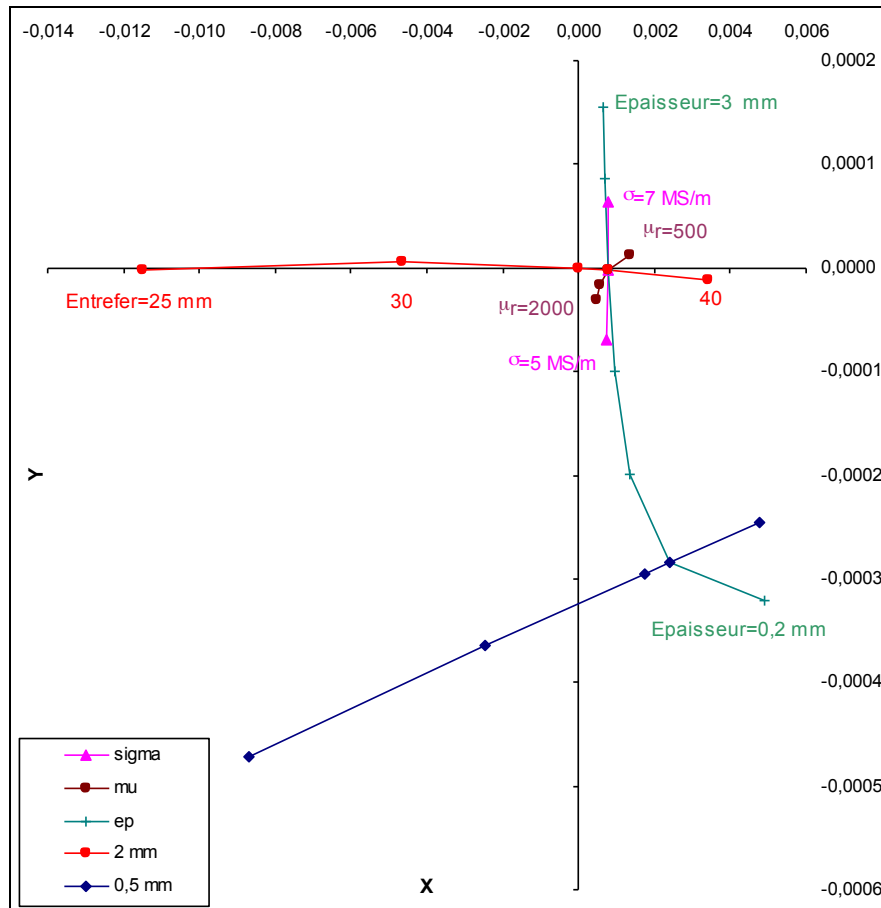


Figure 19 : B_z (μT) fonction de la conductivité σ et de la perméabilité relative μ_r à 10 Hz

Les courbes correspondant à $e=2 \text{ mm}$ et $e=0,5 \text{ mm}$ ont été retracées afin de servir de repère.

L'influence de la variation de μ_r est faible par rapport à celle de l'épaisseur.

Celle de σ est plus importante mais comme σ varie peu, sa répercussion est mineure.

L'influence de μ_r et de σ sont donc peu contraignantes sur la mesure.

La distinction entre deux tôles d'épaisseur 0,5 mm et 2 mm peut se faire malgré les variations des paramètres μ_r et σ .

□ Effet de la corrosion

Les effets de la corrosion ont été simulés par l'introduction dans le modèle d'une couche d'oxyde (matériau de très faible conductivité).

La tôle est divisée en deux zones : une zone interne (côté fluide circulant) et une zone externe. L'épaisseur de la zone interne est notée e_{int} et celle de la couche externe e_{ext} .



Le dépôt de conduites soupçonnées atteintes par la corrosion a permis de constater l'augmentation de l'épaisseur de la tôle avec le phénomène de corrosion. Cette augmentation est également simulée sous CIVA-CF/Messine.

Le tableau suivant montre les configurations simulées.

| e_{int} (mm) | σ_{int} ($\cdot 10^6 \text{ S.m}^{-1}$) | e_{ext} (mm) | σ_{ext} ($\cdot 10^6 \text{ S.m}^{-1}$) |
|----------------|--|----------------|--|
| 0,5 | 0,001 | 1,5 | 6 |
| 1 | 0,001 | 1 | 6 |
| 1,5 | 0,001 | 0,5 | 6 |
| 2 | 0,001 | 0 | 6 |
| 3 | 0,001 | 0 | 6 |
| 4 | 0,001 | 0 | 6 |

Tableau 5 : Valeurs de σ étudiées simulant la corrosion

Le graphique présente le résultat des mesures effectuées.

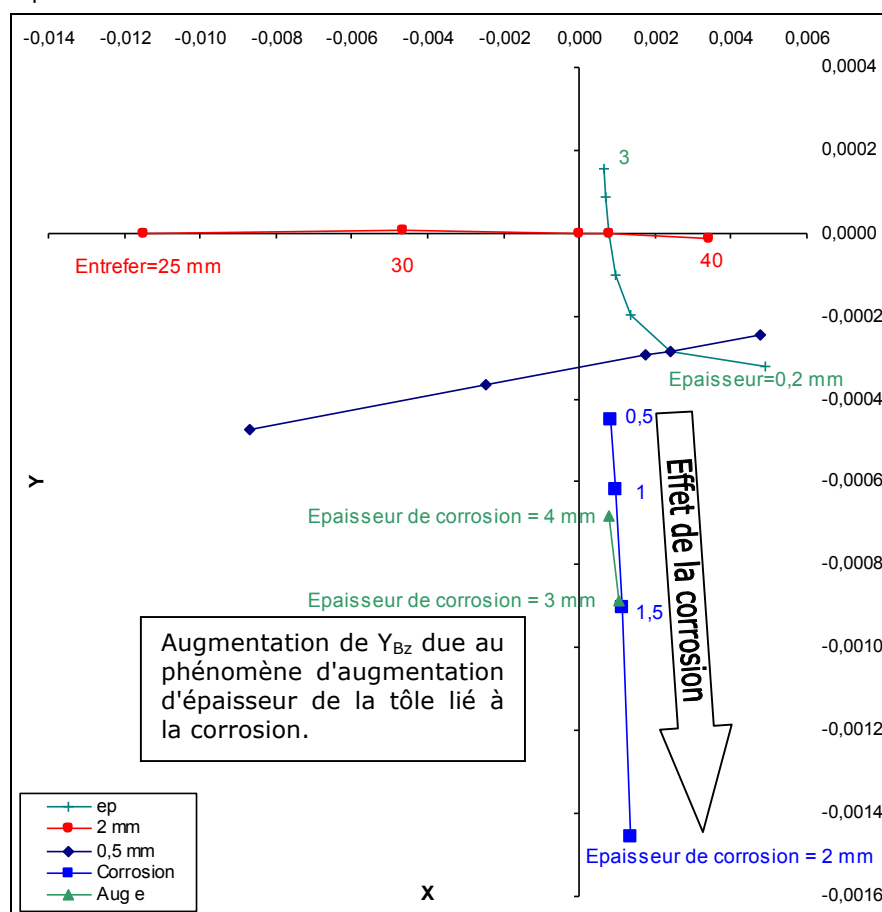


Figure 20 : Effet de la corrosion sur B_z (μT) à 10 Hz

La corrosion influe sur B_z de manière similaire à une diminution de l'épaisseur de la tôle. Le phénomène d'augmentation d'épaisseur de la tôle lié à la corrosion implique une augmentation de la partie imaginaire de B_z mais insuffisante pour atteindre la valeur d'une tôle de 0,5 mm saine.

□ Mesure de l'entrefer à 5 kHz

L'objectif de cette simulation est de vérifier qu'une fréquence élevée permet d'effectuer une mesure de l'entrefer E en s'affranchissant de l'influence de l'épaisseur de la tôle.

Les valeurs des paramètres étudiés sont identiques aux simulations précédentes.

Le graphique suivant présente les résultats de simulation de l'influence des paramètres μ_r et σ à 5 kHz.

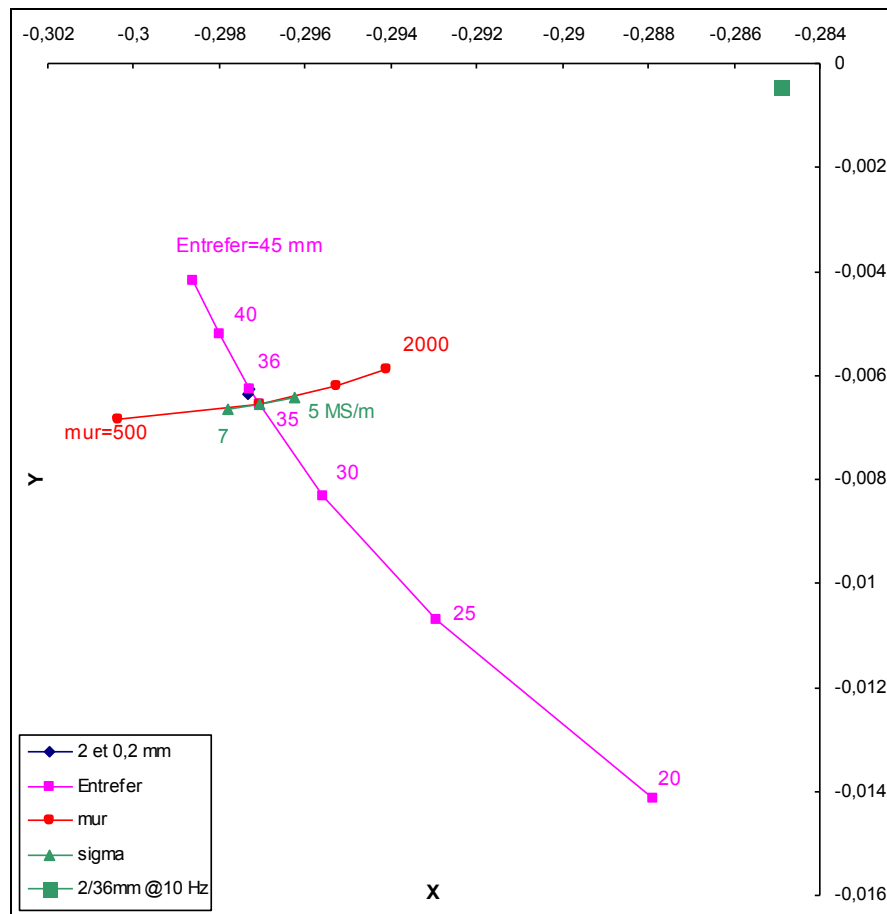


Figure 21 : B_z (μT) fonction de la conductivité σ et de la perméabilité relative μ_r à 5 kHz

A 5 kHz, le capteur est très peu sensible à la variation de l'épaisseur de la tôle (faible profondeur de pénétration standard : $\delta=0,09$ mm).

L'influence de μ_r et de σ se fait suivant 2 phases bien distinctes par rapport à l'entrefer.

L'information entrefer est bien séparable des autres grandeurs.

Cette fréquence convient donc bien pour une mesure de l'entrefer E en s'affranchissant de l'influence de l'épaisseur de la tôle.

6. Essais expérimentaux

Les résultats de simulation obtenus vérifient la faisabilité de la mesure d'épaisseur d'une tôle d'acier à différents entrefers. Ils doivent cependant être vérifiés par des essais et complétés par des essais tenant compte de l'armature acier de la couche de béton extérieure.

Des essais en laboratoire ont donc été entrepris.

6.1. Le moyen d'essai

Le diamètre des conduites étudiées est relativement grand ($d_{\text{ext}}=730$ mm) devant celui de la bobine excitatrice simulée (4,25 mm). La surface de la conduite est approchée par un plan. Cette approximation reste représentative de la réalité et facilite grandement la réalisation d'essais en laboratoire.

Des essais permettant l'étude des paramètres influents ont été réalisés.

Les paramètres influents sont :

- e : l'épaisseur de l'âme tôle,
- E : l'entrefer (distance capteur-tôle),
- μ_r : la perméabilité relative de la tôle,
- σ : la conductivité de la tôle,
- f : la fréquence d'excitation,
- l'armature et sa position.

μ_r et σ sont intrinsèques à la plaque étudiée.

Afin de faire varier les autres paramètres et observer leur influence, nous disposons de :

- tôles en acier d'épaisseur : 3 / 2,5 / 2 / 1,5 / 0,8 / 0,5 mm,
- plaques en plexiglas d'épaisseur : 2 / 5 / 8 / 10 mm, qui joueront le rôle du béton¹¹.

Les instruments de mesures et appareils suivants sont utilisés :

- générateur de fonctions,
- amplificateur de courant,
- Lock-In (détection synchrone).

Le capteur utilisé sensible au mesurande *induction magnétique verticale* est le microfluxgate.

Les magnétomètres de type fluxgate sont des instruments utilisés pour mesurer les composantes vectorielles d'un champ magnétique. Leur plage typique de mesure s'étend de 0,1 nT à environ 1 mT du continu à quelques kHz. La sensibilité du fluxgate est typiquement de $100 \text{ mV} \cdot \mu\text{T}^{-1}$.

Le CEA LETI a développé et réalisé un fluxgate intégré (microfluxgate – [19]).

Le schéma suivant illustre le principe de fonctionnement du fluxgate.

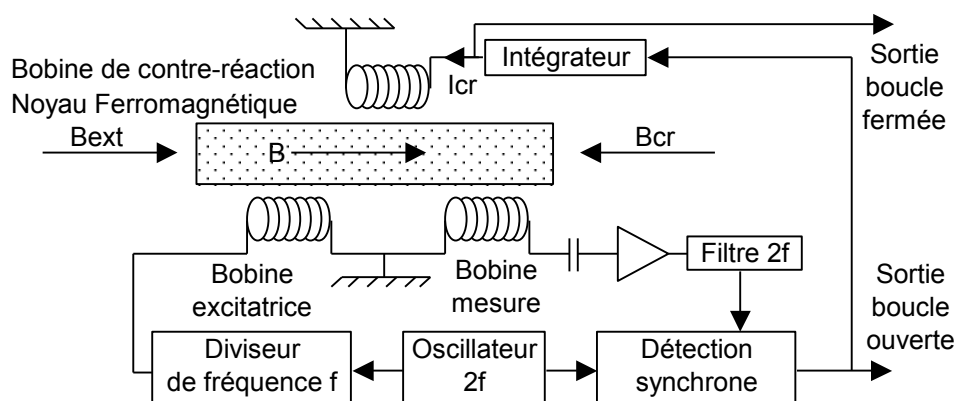


Figure 22 : Schéma de principe de mesure du fluxgate

B_{ext} : champ extérieur à mesurer
 I_{cr} : courant de contre-réaction
 B_{cr} : champ de contre-réaction

La bobine de contre-réaction, permet :

- L'extension de la dynamique,
- Le travail du noyau autour du champ nul,
- La mesure de B_{ext} par I_{cr} .

¹¹ Le plexiglas a un comportement similaire à celui du béton vis-à-vis des ondes électromagnétiques.

L'excitation se fait à la fréquence f . La mesure de l'harmonique $2f$ est réalisée en sortie.

Deux cas de figure se présentent alors :

1. il n'y a pas de champ extérieur \rightarrow l'amplitude de l'harmonique $2f$ est nulle ;
2. il y a un champ extérieur B_{ext} \rightarrow l'amplitude de l'harmonique $2f$ est proportionnelle à B_{ext} .

La photo du capteur utilisé lors des essais est visible sur la figure suivante.

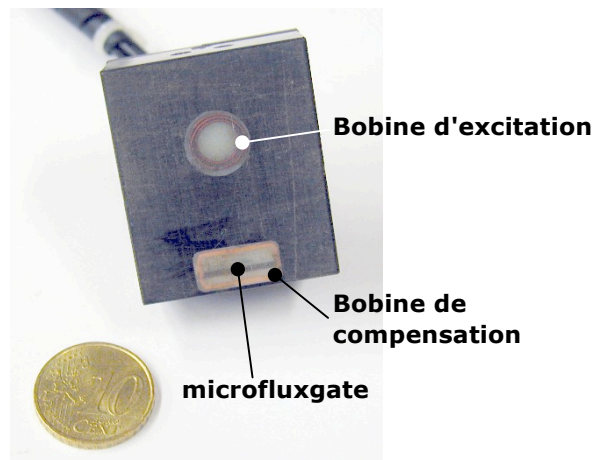


Figure 23 : Capteur fluxgate (vue de dessous)

Le microfluxgate fait l'objet de brevets CEA. Le coût constaté d'un fluxgate est de 1 000 US\$ [22].

6.2. Les essais réalisés

La visualisation des mesures se fait sur oscilloscope mais les valeurs sont relevées sur le Lock-In.

Les résultats obtenus lors des essais sont appréciés dans le plan complexe, appelé aussi plan de Lissajous.

Remarque : Toutes les valeurs sont recalées de façon à ce que le point correspondant à $e=2$ mm et $E=35$ mm soit à 0 (0 ; 0) et que le point correspondant à $e=2$ mm et $E=25$ mm soit sur l'axe des abscisses ; ceci afin de pouvoir comparer plus facilement les résultats des essais et les simulations effectuées.

6.2.1. Mesures SANS ARMATURE

Une première série d'essais SANS ARMATURE a été réalisée afin de conforter les résultats de simulation. La figure suivante représente le schéma du montage expérimental utilisé.

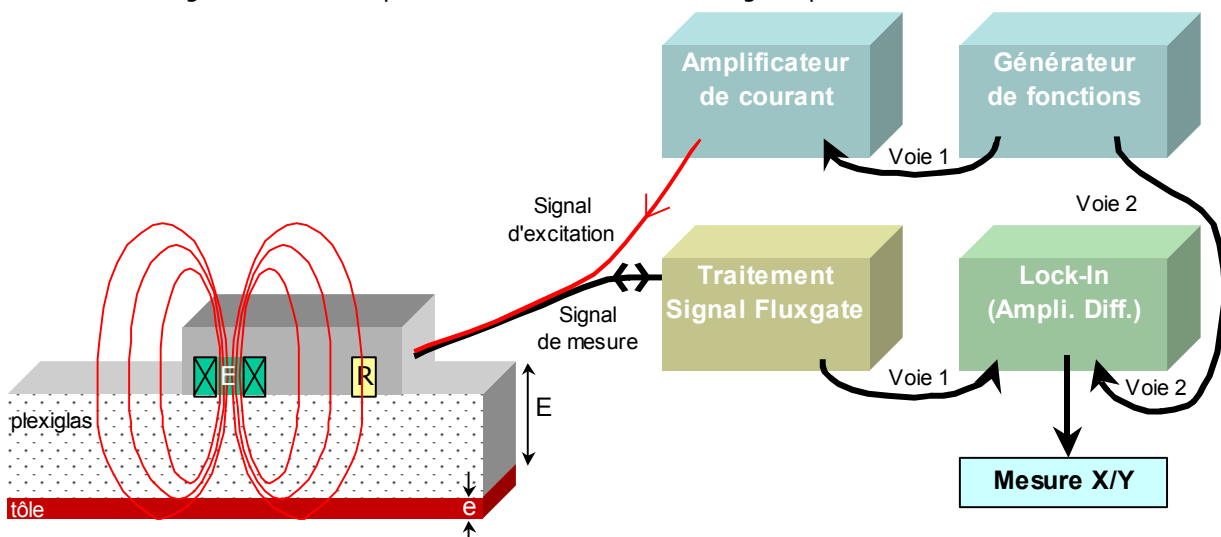


Figure 24 : Schéma du montage expérimental SANS ARMATURE

Une photographie des instruments de mesure a été prise. Elle est consultable à l'annexe 5.

Les valeurs des paramètres influents étudiées sont fonction des tôles disponibles.

| Épaisseur tôle e (mm) |
|----------------------------|
| 0,5 |
| 0,8 |
| 1,5 |
| 2 |
| 3 |

| Entrefer E (mm) |
|----------------------|
| 25 |
| 30 |
| 35 |
| 40 |

| σ et μ_r |
|-------------------------------|
| Fixées par la tôle étudiée |

Tableau 6 : Valeurs des paramètres influents étudiées lors des essais

Le relevé de mesure de la première série d'essais permet de tracer le graphique suivant.

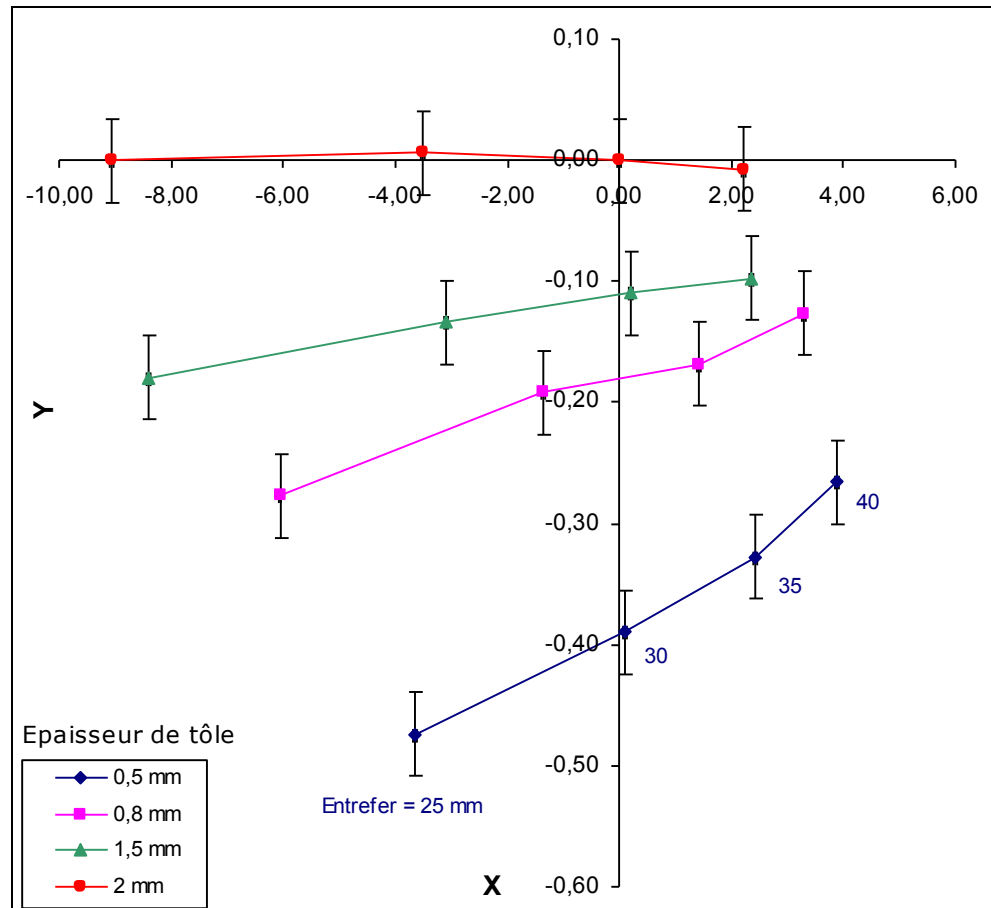


Figure 25 : Mesure de B_z fonction de l'épaisseur e et de l'entrefer E à 10 Hz SANS ARMATURE

Chaque courbe représente une épaisseur de tôle et chaque point sur une courbe un entrefer différent.

Les barres d'erreur reportées sur les courbes, sont le résultat d'une série de mesure de répétabilité.

L'influence de l'épaisseur et de l'entrefer sur le signal se fait suivant 2 phases différentes. Cependant, la variation du signal suivant Y est 29 dB plus faible que suivant X.

Les résultats de l'essai sont en accord avec la simulation *Civa CF* réalisée (c.f. : Figure 18).

De tels résultats valident la faisabilité de la mesure de l'épaisseur d'une tôle en acier enrobée MAIS SANS ARMATURE.

La constitution d'un abaque serait une solution permettant l'inversion des données et ainsi la détermination de l'épaisseur.

6.2.2. Mesures AVEC ARMATURE

La première série (SANS ARMATURE) ayant donné des résultats positifs, une seconde séquence d'essais a été effectuée, cette fois, AVEC L'ARMATURE.

L'instrumentation est la même que lors des essais SANS ARMATURE.

La figure suivante représente le schéma du montage expérimental utilisé.



Figure 26 : Schéma du montage expérimental AVEC ARMATURE

L'épaisseur de la tôle est notée e , l'entrefer au-dessus de l'armature $E2$ et $E1$ en dessous.

La photo suivante laisse apparaître la grille, faisant office d'armature, ainsi que la tôle d'acier utilisées lors des essais.

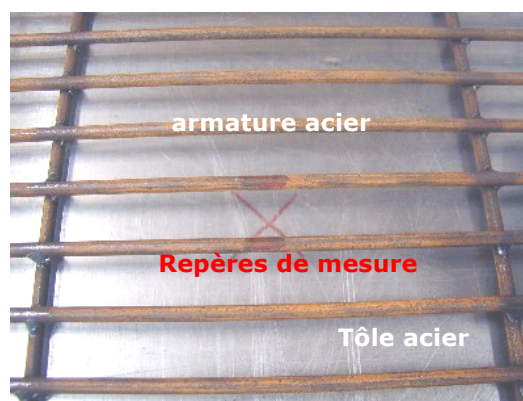


Figure 27 : Vue de la tôle d'acier, de l'armature et de leurs repères

La tôle est de forme carrée de 500 mm de côté. Un repère au marqueur indélébile (X) a permis de réaliser les mesures systématiquement au même endroit.

L'armature est en acier rond de 6 mm de diamètre. Deux repères ont également été pris sur l'armature. Son épaisseur totale est de 13 mm. Un schéma dimensionnel détaillé se trouve à l'annexe 4.

Lors des essais AVEC ARMATURE, le capteur est positionné entre deux fils transversaux consécutifs de l'armature et sur une plaque de plexiglas ($E1$), comme cela est visible sur la Figure 28.

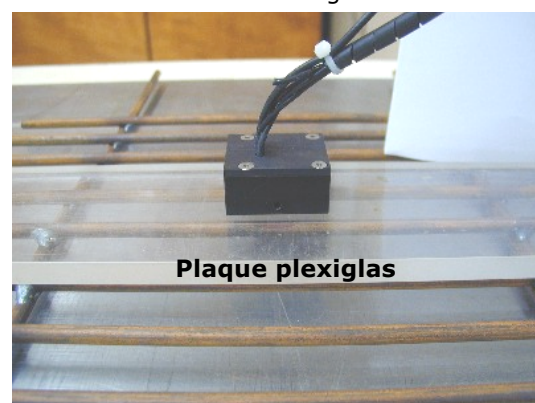
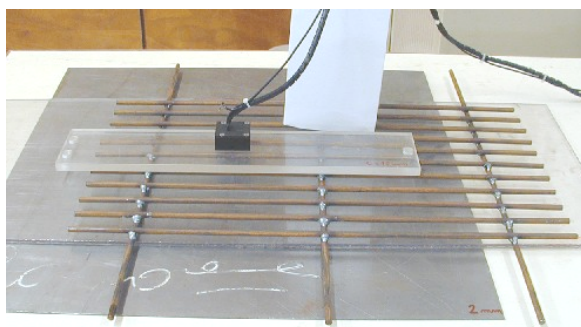


Figure 28 : Capteur fluxgate sur la maquette plane d'essai

L'armature est maintenant prise en compte. L'essai est représentatif de la réalité.

Le relevé de mesure permet le tracé du graphique suivant.

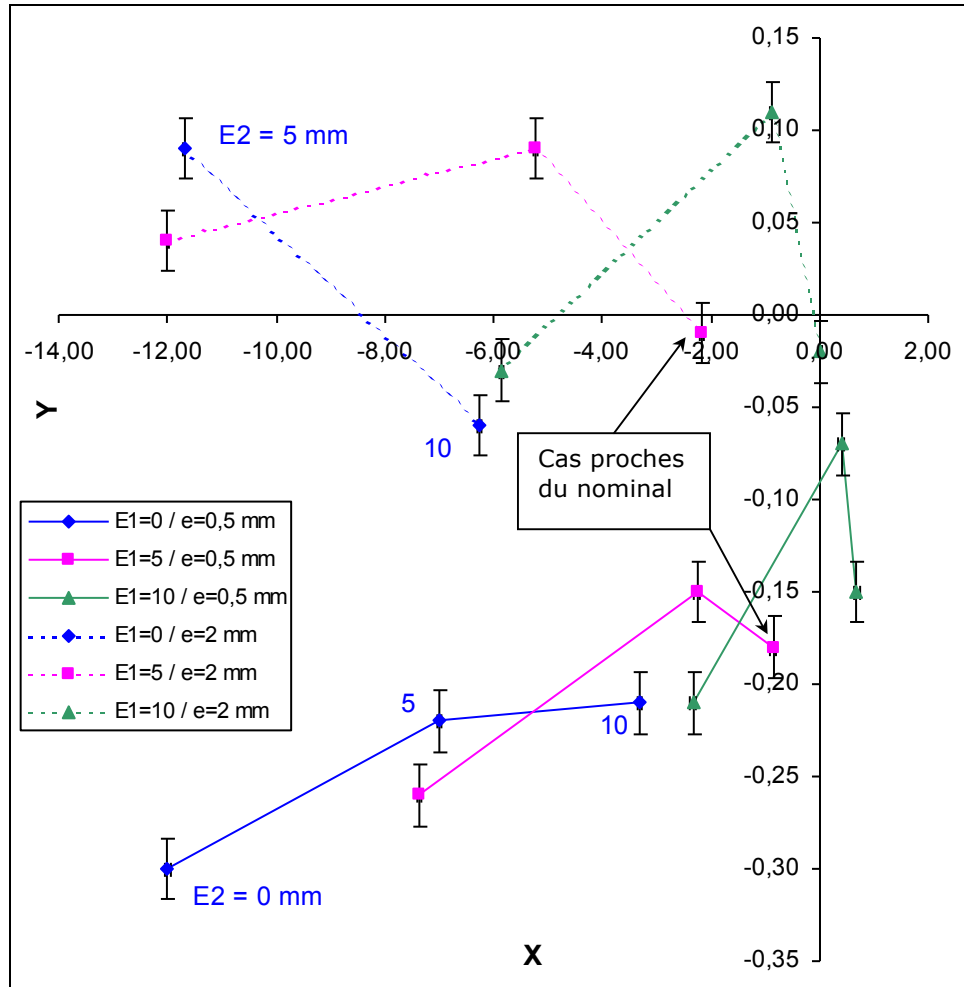


Figure 29 : Mesure de B_z fonction de l'épaisseur e et de l'entrefer E à 10 Hz AVEC ARMATURE

Les courbes en trait plein sont issues de mesures réalisées sur une tôle de 0,5 mm d'épaisseur.

Les courbes en trait pointillé sont issues de mesures réalisées sur une tôle de 2 mm.

Les courbes bleues (\diamond) représentent les mesures pour E_1 (entrefer sous l'armature) est égal 0.

Les courbes roses (\blacksquare) représentent les mesures pour $E_1 = 5$ mm.

Les courbes vertes (\blacktriangle) représentent les mesures pour $E_1 = 10$ mm.

Chaque point d'une courbe représente une mesure de E_2 (entrefer au-dessus de l'armature) valant pour le point de gauche 0 mm, 5 mm pour le point du centre et 10 mm pour le point de droite.

Les résultats montrent que les informations restent séparables mais que l'analyse des valeurs est complexe.

La présence de l'armature dévie les lignes de champ et influe de façon significative sur les mesures.

La position (couple E_1/E_2) de l'armature module les résultats de mesure. Il convient de détecter par CF sa position afin d'estimer la zone du plan de Lissajous concerné par la mesure.

La discrimination entre deux tôles, l'une de 0,5 mm d'épaisseur et l'autre de 2 mm, reste réalisable.

Obtenir une très bonne résolution sera difficile mais une perte importante d'épaisseur de la tôle sera détectable en vue d'une maintenance.

6.2.3. Mesure de la distance surface – armature

L'objectif de cet essai est de déterminer si l'utilisation d'une fréquence haute permet d'évaluer le paramètre E2. Comme le montre l'essai précédent, la distance surface – armature influe sur les mesures. Une mesure de la distance surface – armature a donc été réalisée.

Le capteur est positionné au-dessus d'un fil de l'armature.

E1 est fixé à 5 mm, E2 varie de 28 à 38 mm.

Le graphique suivant présente les résultats.

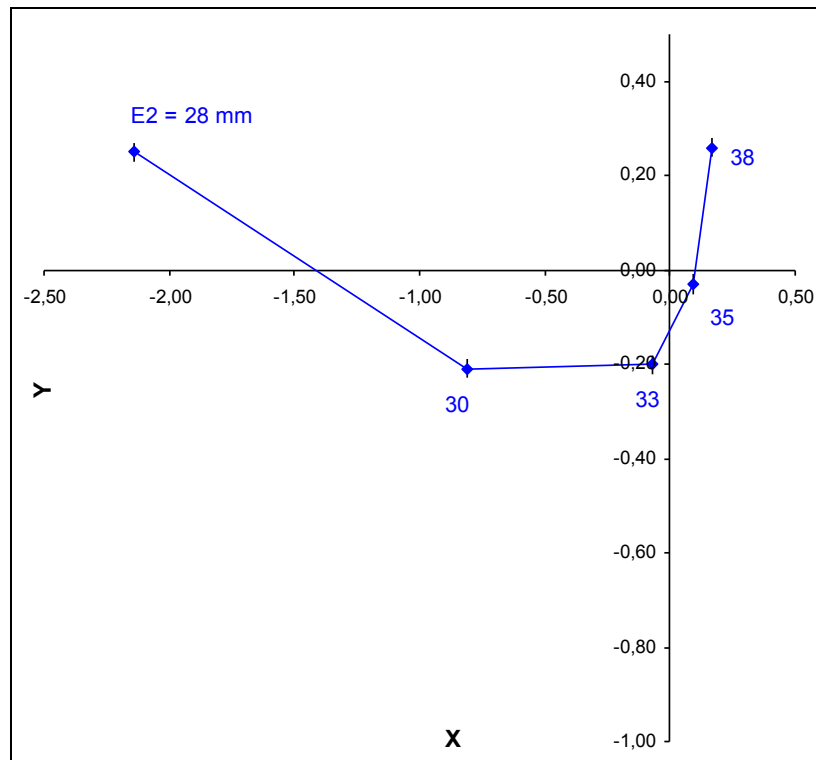


Figure 30 : Mesure de Bz fonction de la distance surface – armature à 5 kHz

Un abaque doit être constitué afin de permettre l'inversion des données de mesure.

La mesure de la distance surface – armature est possible.

6.3. Procédure de mesure

Expérience acquise au travers des simulations et essais, une procédure de mesure peut être proposée en plusieurs étapes :

1. localisation des fils longitudinaux et transversaux de l'armature ;
2. positionnement au-dessus d'un fil transverse à équidistance d'un fil longitudinal ;
3. mesure de la distance surface – armature à la fréquence de 5 kHz ;
4. positionnement au centre d'une "fenêtre" entre les fils de l'armature ;
5. mesure de l'entrefer à la fréquence de 5 kHz ;
6. mesure de l'épaisseur de la tôle à 10 Hz ;
7. consultation de l'abaque ;
8. fourniture d'une mesure d'épaisseur.

remarques :

- La constitution préalable d'un abaque est nécessaire afin d'étalonner le système de mesure. Le système devra être étalonné avant toute série de mesures.
- Une telle mesure devrait durer 4 à 5 minutes.

7. Conclusion

Une étude de faisabilité d'une méthode de mesure physique électromagnétique en vue de la détermination de la réduction d'épaisseur d'une tôle en acier enrobée a été entreprise.

Une première série d'essais SANS ARMATURE a été menée apportant des résultats concluants.

La corrélation entre la simulation et les essais est très bonne.

La prise en compte de l'armature du béton modifie les valeurs de mesure, ce qui était pressenti. Une connaissance de sa position est nécessaire afin d'interpréter correctement les mesures.

Les informations *épaisseur de tôle* et *entrefer* peuvent être séparées des signaux de mesure. Le niveau des signaux renseignant sur l'épaisseur de la tôle est cependant 29 dB plus faible que celui concernant l'entrefer.

La discrimination entre une tôle de 0,5 mm d'épaisseur et une autre de 2 mm, est possible.

Ce projet de fin d'études a permis de vérifier la faisabilité de la détermination de la réduction d'épaisseur d'une tôle en acier enrobée au moyen d'une méthode de mesure physique électromagnétique.

Des essais en laboratoire sur conduite réelle non corrodée sont à entreprendre afin de valider la méthode sur un cas réel.

Pour cela, un abaque de mesures / épaisseur de tôle et entrefer est à construire. L'algorithme de traitement des mesures associées inversant les données délivrant les informations utiles devra être écrit.

Une étude technico-économique est également à mener afin de rendre compte du coût de réalisation d'un tel système de mesure qui doit être transportable et utilisable sur site.

Page laissée intentionnellement blanche.

Annexes

| | |
|---|----|
| Annexe 1 : Sujet du projet de fin d'études | 38 |
| Annexe 2 : La société BONNA SABLA..... | 40 |
| Annexe 3 : Relevé dimensionnel du tronçon de conduite BONNA | 43 |
| Annexe 4 : Schéma de l'armature utilisée en essai..... | 44 |
| Annexe 5 : Photographie de l'instrumentation de mesure..... | 45 |
| Annexe 6 : Jean Bernard Léon Foucault | 46 |

Annexe 1 : Sujet du projet de fin d'études

EDF R&D

DÉPARTEMENT OPP



Chatou, le 19 novembre 2004

Sujet d'étude proposé:

Étude de faisabilité d'une méthode de mesure physique électromagnétique pour déterminer la réduction d'épaisseur d'une tôle en acier enrobée.

*Application au diagnostic non destructif de l'état de corrosion des circuits d'eau brute secourue des centrales nucléaires :
Étude paramétrique par simulation numérique et validation expérimentale*

Domaine : Mesure physique et électromagnétisme.

Le circuit SEC (Eau Brute Secourue) a pour fonction d'assurer le refroidissement du circuit RRI (Réfrigération Intermédiaire) des centrales nucléaires à eau pressurisée. Ce circuit étant classé Important Pour la Sécurité (IPS), il doit répondre à un certain nombre d'exigences, dont notamment :

- L'étanchéité de conduites d'amenée d'eau constituées d'un tube métallique de \varnothing 600mm - l'âme tôle - enrobée de béton ;
- La résistance au séisme de l'infrastructure dont la stabilité mécanique repose pour moitié sur l'âme tôle, et pour moitié sur les armatures métalliques noyées dans le revêtement externe en béton de la conduite.

Pour satisfaire ces exigences, EDF souhaite disposer d'une méthode d'investigation qui permette de diagnostiquer l'état de ces conduites de manière non destructive. L'objectif industriel est de déceler au plus tôt les zones affectées par la corrosion, de manière à pouvoir mettre en œuvre une stratégie de maintenance optimisée du réseau de conduites.

Dans ce contexte, EDF R&D a entrepris de recenser les méthodes de mesure disponibles industriellement. Un plot d'essais a été réalisé afin de pouvoir évaluer les performances des techniques d'auscultation disponibles sur le marché. En particulier, les techniques basées sur les courants de Foucault ont été tout particulièrement regardées pour détecter et caractériser les pertes d'épaisseur de métal. Les essais d'évaluation réalisés ont montré que les méthodes et outils disponibles sur le marché ne sont pas adaptés pour fournir ces informations.

Le but du stage est donc de concevoir un dispositif prototype de contrôle par courants de Foucault qui soit adapté à l'auscultation des conduites d'EDF, en s'appuyant sur la méthodologie appliquée en CND des matériaux métalliques (tubes de générateurs de vapeurs par exemple).

L'étude comprend deux parties :

- **La 1^{ère} partie de l'étude porte sur la conception du dispositif de contrôle**

Elle s'appuiera notamment sur la **modélisation** du contrôle par courants de Foucault de l'épaisseur résiduelle d'une tôle métallique (épaisseur nominale 2 mm). Une phase d'analyse préliminaire consiste à recenser les codes de calculs appropriés pour traiter ce cas d'application particulier (Flux 2D et 3D, CIVA-CF, etc.). L'étude théorique sera conduite en prenant en compte le signal complet (Amplitude et Phase), et certainement en ayant recours à des combinaisons de fréquences pour éliminer le signal perturbateur dû à la présence des armatures métalliques.

L'outil de simulation retenu permettra de mener une étude paramétrique en CF (classiques, pulsés, champs lointain,...), afin de déterminer les caractéristiques techniques d'un système de mesure CF adapté à cette application.

- **La 2^{ème} partie de l'étude porte sur la validation expérimentale du dispositif de contrôle**

Il s'agira dans un premier temps d'évaluer la faisabilité expérimentale du contrôle de l'épaisseur résiduelle d'une tôle métallique, de chiffrer le coût de réalisation d'un système de mesure prototype, sur la base des résultats de la modélisation, et d'en réaliser la fabrication.

Il s'agira ensuite de valider le dispositif prototype par des essais expérimentaux : sur des maquettes de géométrie plane, puis sur les 3 tronçons de tuyauteries disponibles à EDF-R&D Les Renardières.

Organisation de l'étude et dispositions particulières :

- Unité d'accueil : EDF - DIVISION RECHERCHE & DEVELOPPEMENT
Département Optimisation des Performances des Process (OPP)
Groupe Ingénierie des Systèmes de Mesure
- Lieu du stage : CEA/Saclay 91191 Gif-sur-Yvette cedex
- Les calculs théoriques préliminaires, la définition de l'instrumentation et les essais de faisabilité en laboratoire seront conduits avec la collaboration du laboratoire partenaire (à définir). Un petit tronçon de conduite pourra être mis à disposition du laboratoire partenaire pour cette phase de faisabilité.
- Responsable direct du stage : Gauthier Vercoutère ☎ 01 30 87 72 33 gauthier.vercoutere@edf.fr
- Responsable du suivi technique : Ghislain Thomas... ☎ 01 30 87 76 86 ghislain.thomas@edf.fr

Annexe 2 : La société BONNA SABLA

En 1894, la Société Bonna a été créée par Aimé Bonna, inventeur d'un nouveau type de tuyaux en béton armé, le tuyau "âme tôle". La société s'est développée rapidement autour de ce produit en France et à l'étranger. Elle rejoint en 1924 la Compagnie Générale des Eaux (CGE) et prend le nom de "Société des Tuyaux Bonna".

La société Sabla, créée en 1892 avec pour activité première **l'extraction et la fabrication de chaux, se diversifie rapidement** dans la fabrication de produits en béton. Elle rejoint en 1988 la CGE via la Société Générale d'Entreprises (SGE) dont elle est alors filiale.

Au fil des ans, les deux sociétés étendent leur savoir-faire à d'autres produits et procédés (produits pour l'assainissement, ouvrages de génie civil, traverses de chemin de fer, mobilier urbain, revêtements de sol, ensembles funéraires, systèmes d'épuration, travaux spéciaux) et se développent en France et à l'international.

En 1997, les deux sociétés, filiales de la CGE, spécialisées dans l'industrie du béton préfabriqué, entament leur rapprochement pour ne plus former qu'une seule entité début 2001 sous le nom de Bonna Sabla. A la fin de l'année 2002, la CGE, filiale de Veolia Environnement, cède Bonna Sabla dans le cadre d'un "Leverage Buy Out" (LBO), à une société holding de reprise, PCP Holding, dont elle reste actionnaire.

Les coordonnées :

Tour Ariane,
5 place de la Pyramide
92088 Paris La Défense Cedex
Téléphone : 33 (0)1 46 53 24 00
Télécopie : 33 (0)1 46 53 24 11
www.bonnasabla.com

La page d'accueil Internet :



Quelques chiffres :

| | |
|------------------------------|---|
| Chiffre d'affaires consolidé | 360 millions d'euros (dont 30% à l'international) |
| Effectifs du groupe | 2700 salariés |
| Sites de production | 45 en France 11 dans les filiales et participations à l'étranger |
| Production annuelle | 2,3 millions de tonnes de produits en béton dont 2500 kms de tuyaux 400 kms de voies ferrées équipées en traverses Sateba 4,5 millions de bordures |

Les tronçons de conduite de 6,15 m chacun sont raccordés au moyen d'un joint élastomère et béton afin d'assurer l'étanchéité et la tenue mécanique de l'ouvrage.

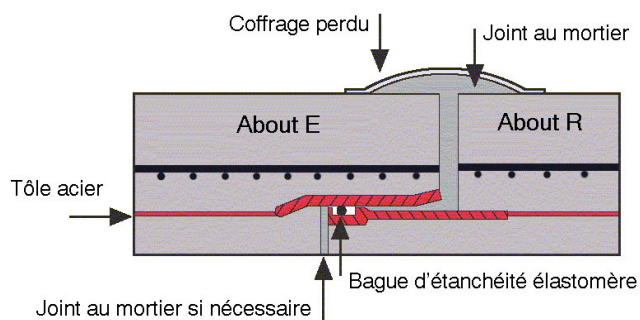


Figure 31 : Schéma en coupe du joint inter-tronçon

Le savoir-faire :



Réalisation pour EDF :

FRANCE - Adduction et conduites pression

Production électrique - Canalisation béton AME TOLE



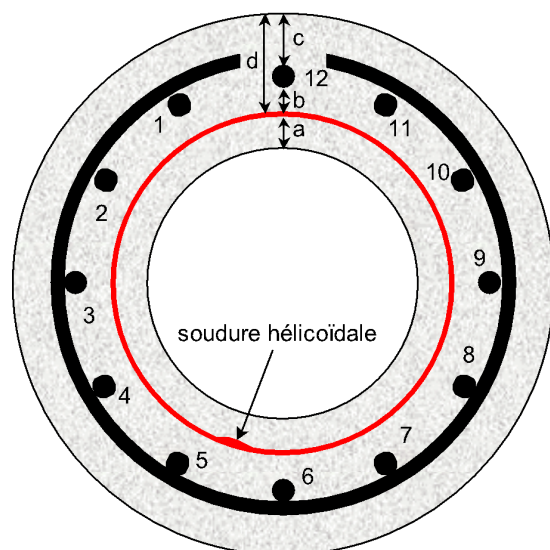
Implantations :



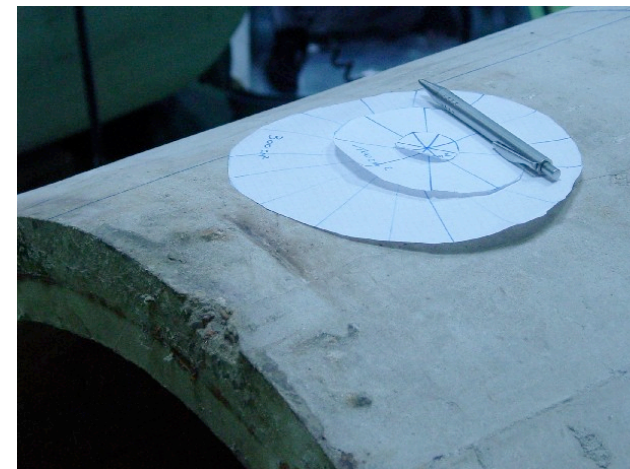
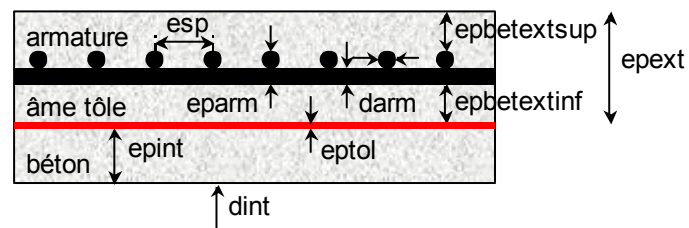
Annexe 3 : Relevé dimensionnel du tronçon de conduite BONNA

Un tronçon d'un mètre de conduite BONNA a été déposé et préalablement utilisé pour des essais de détection de percement au moyen de techniques RADAR.

La couche de béton interne a été détruite puis reconstruite en trois endroits afin de réaliser 3 percements artificiels circulaires de l'âme tôle de 50, 100 et 300 mm² (illustration de droite).



Les schémas de gauche et ci-dessous rappellent les paramètres dimensionnels de la conduite.



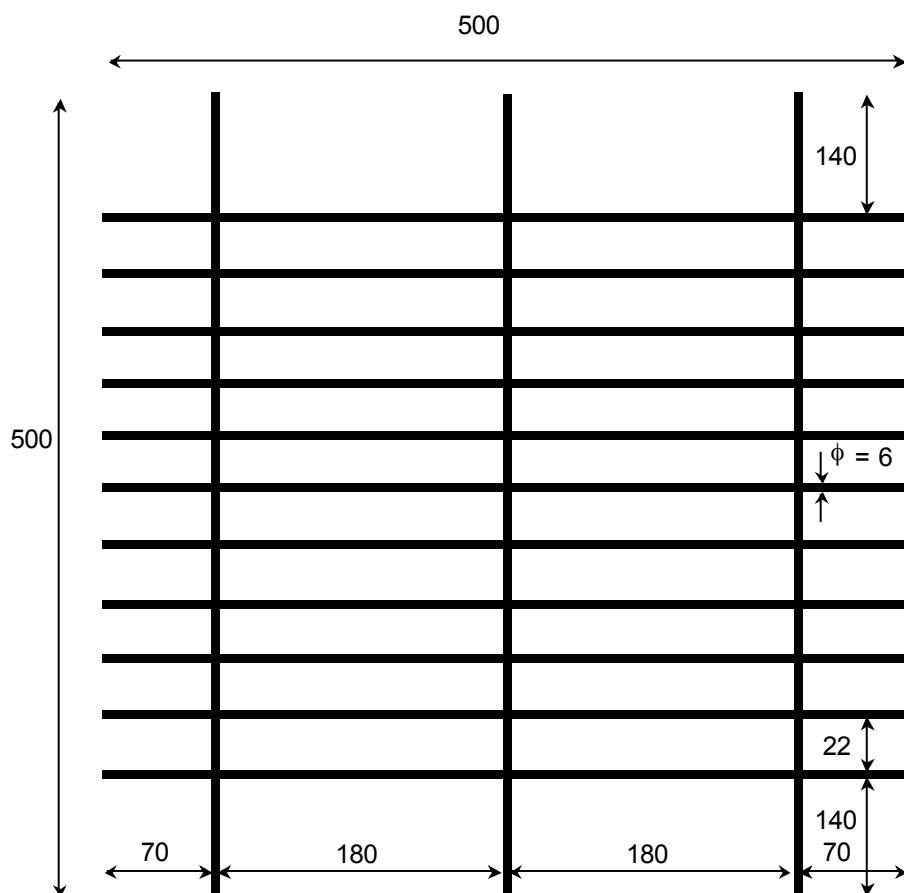
| armature n° | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | min | max | max-min | moy | σ | 2σ | m-2σ | m+2σ |
|-------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|---------|------|-----|-----|------|------|
| epbetint | a | 26 | 27 | 25 | 24 | 25 | 24 | 24 | 26 | 27 | 26 | 28 | 25 | 24 | 28 | 4 | 25,6 | 1,3 | 2,6 | 23,0 | 28,2 |
| epbetextinf | b | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 6 | 3 | 3 | 5 | 5 | 6 | 3 | 6 | 3 | 4,6 | 1,0 | 2,0 | 2,6 | 6,6 |
| c | c | 26 | 24 | 23 | 26 | 25 | 22 | 23 | 25 | 23 | 25 | 23 | 22 | 22 | 26 | 4 | 23,9 | 1,4 | 2,9 | 21,0 | 26,8 |
| epext | d | 37 | 36 | 36 | 37 | 35 | 34 | 36 | 35 | 37 | 37 | 35 | 35 | 34 | 37 | 3 | 35,8 | 1,0 | 2,1 | 33,8 | 37,9 |
| darm | | 7 | 7 | 8 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 8 | 2 | 7,0 | 0,4 | 0,9 | 6,1 | 7,9 |

Tableau 7 : Résultats des mesures effectués sur le tronçon de conduite déposé

L'âme tôle étant enfermée dans le béton, la mesure de son épaisseur au pied à coulisse n'est pas possible. Une seule zone de détérioration du béton laisse cependant apparaître la tôle permettant une mesure dont le résultat est $2,2 \pm 0,1$ mm.

NB : darm est obtenue par calcul ($d - (b + c)$) et n'est pas le résultat d'une mesure.

Annexe 4 : Schéma de l'armature utilisée en essai



L'armature représentative de la réalité utilisée lors des essais a une épaisseur de 13 mm.

Annexe 5 : Photographie de l'instrumentation de mesure



L'alimentation signal fluxgate est une réalisation CEA / LETI. Elle alimente le microfluxgate et délivre un signal de mesure proportionnel à l'induction magnétique.

L'amplificateur de courant permet de combler le manque de courant que délivre le générateur de fonction afin d'augmenter l'intensité des CF dans la tôle.

Le filtre amplificateur a été utilisé lors d'essais préliminaires.

Le générateur de fonction (modèle TTi TGA 1242) émet une première sinusoïde à destination de la bobine d'excitation du fluxgate et une seconde permettant d'observer les variations autour d'un point zéro.

L'oscilloscope est configuré en mode X/Y pour la visualisation du point de mesure.

Le Lock-In (EG&G Princeton Applied Research MODEL 5302) amplifie les signaux et réalise une détection synchrone. Il délivre la partie réelle et imaginaire du signal différentiel (fluxgate - sinusoïde de compensation)

Annexe 6 : Jean Bernard Léon Foucault

Fils d'un éditeur, Foucault naît à Paris le 18 septembre 1819. Ses premières années d'études se font en grande partie à la maison. Il entame ensuite des études de médecine qu'il abandonne pour se tourner vers la physique. Il s'intéresse tout d'abord aux expériences de L.J.M. Daguerre sur la photographie. Pendant trois ans, il assiste Alfred Donné (1801-1878) pour ses conférences sur l'anatomie microscopique.

Avec A.H.L. Fizeau, il mène une série d'expériences sur l'intensité de la lumière du soleil, en la comparant à celle du carbone dans la lampe à arc, et à celle de la chaux dans la flamme du chalumeau oxyhydrique. Il s'intéresse également à l'interférence du rayonnement infrarouge, aux parcours des rayons lumineux et à la polarisation chromatique de la lumière.

Dans les années 1840, il contribue aux Comptes Rendus, décrivant un régulateur électromagnétique pour les lampes à arc électrique, et, en collaboration avec Henri Victor Regnault, rédige un article sur la vision binoculaire.

En 1850, grâce à un miroir inversé tel que celui utilisé par Sir Charles Wheatstone pour mesurer la vitesse des courants électriques, il démontre que la lumière se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau. Il établit que la vitesse de la lumière varie inversement à l'indice de réfraction du milieu où elle se propage.

En 1851, il établit la rotation quotidienne de la terre en utilisant la rotation libre du plan d'oscillation d'un long et lourd pendule suspendu au Panthéon à Paris. Pour cette démonstration, ainsi que pour l'invention du gyroscope, il reçoit en 1855 la médaille Copley de la Société Royale de Londres, une importante récompense scientifique. Il devient la même année assistant en physique à l'Observatoire impérial de Paris.

En septembre de la même année il découvre que la force nécessaire à la rotation d'un disque de cuivre augmente quand il doit tourner avec sa jante entre les pôles d'un aimant, le disque chauffant dans le même temps du fait des « courants de Foucault » induits dans le métal. « L'aimant et le corps conducteur tendent par une influence mutuelle à un repos relatif ».

Foucault invente en 1857 le polarisateur qui porte son nom et l'année suivante, il conçoit une méthode pour donner aux miroirs des télescopes réfléchissant la forme d'un sphéroïde ou d'un paraboloïde de révolution.

Avec le miroir réfléchissant de Wheatstone il établit en 1862 la vitesse de la lumière à 298 000 km/s ; 10 000 km/s de moins que les précédentes expériences, et à 0,6 % de marge des valeurs actuellement acceptées. Il est nommé en 1862 membre du bureau des longitudes, et fait Officier de la Légion d'Honneur. En 1864, il est reçu comme membre étranger à la Royal Society de Londres, et l'année suivante, entre à la Section mécanique de l'Institut.

Il publie en 1865 un article sur le gouvernail de Watt, dont il a essayé de rendre la période de révolution constante, et sur un nouvel appareil de régulation de la lumière électrique.

L'année suivante, il montre comment, en déposant une fine couche transparente d'argent du côté externe du verre d'un télescope, on peut regarder le soleil sans danger pour l'œil. À partir de 1845, il est rédacteur en chef de la section scientifique du Journal des Débats. Ses articles majeurs peuvent être trouvés dans les Comptes Rendus (1847-1869).

Foucault meurt le 11 février 1868 à Paris à l'âge de 49 ans. Il est enterré au cimetière de Montmartre.

L'astéroïde 5668 Foucault a été nommé en son honneur.

Ces informations sont issues des sites Internet [20] et [21].

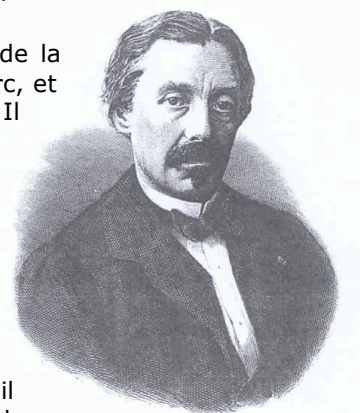


Figure 32 : Machine d'induction de Foucault (1855)

Page laissée intentionnellement blanche.

Index alphabétique

Erreur ! Aucune entrée d'index n'a été trouvée.

Bibliographie

- [1] <http://www.cea.fr>
- [2] <http://www.edf.fr>
- [3] G. Vercoutere – *Premier état de l'art des techniques d'inspection de conduites et d'identification des méthodes les plus pertinentes pour la mesure de l'épaisseur résiduelle de l'âme en tôle des conduites Bonna* – HP-18/02/004/A – EDF R&D OPP ISM – janvier 2002
- [4] <http://www.bonnasabla.com>
- [5] BONNA SABLA - Guide produit – La canalisation béton à âme en tôle – Edition 02/2004
- [6] S. Vorojtsov – *Calculation of the Various Contributions from Magnetic Material – Status of the Dubna B-field activity* – Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia – Meeting on ATLAS magnetic field, 25th February 1999, CERN
- [7] G. TANNEAU – *Comparaison mesures locales-calcul de champs électromagnétiques à proximité de la cuve d'un transformateur* – HM-18/94/0032 – Direction des Etudes et Recherches Service Matériel Electrique, EDF – 13 décembre 1994
- [8] G. Vercoutere – *DURO-GC Faisabilité de l'inspection des conduites BONNA par courants de Foucault en champs lointains Résultats de l'expertise réalisée par PPIC* – HP-18/04/054/A – EDF R&D OPP ISM – juin 2004
- [9] Principe des courants de Foucault – Support de formation – Groupe Des Laboratoires, EDF
- [10] Technique de **Contrôle Non Destructif** par **Courants de Foucault (Eddy Current Non Destructive Testing)** – Support de formation – CEA LCME
- [11] A. May, D. L. Atherton – *Multi-frequency electromagnetic inspection of pre-stressed concrete cylinder pipe* – Insight Vol. 44 No 2 February 2002
- [12] P. Gaydecki, I. Silva, B.T. Fernandes, Z.Z. Yu – *A portable inductive scanning system for imaging steel-reinforcing bars embedded within concrete* – Department of Instrumentation and Analytical Science, UMIST – Sensors and actuators 84 (2000)
- [13] James E. LENZ – *A review of magnetic sensors* – Proceedings of the IEEE, Vol. 78 No 6 – june 1990
- [14] M. Galas – *Diagnostic de l'état d'un réseau de chaleur à l'aide d'une sonde à induction électromagnétique – Chauffage, Ventilation, Conditionnement d'air* – No 9 septembre 1999
- [15] http://www.steelmillsoftheworld.com/qualities/equivalent_1.htm
- [16] http://visite.artsetmetiers.free.fr/foucault_decouvertes.html
- [17] http://www.rd-tech.com/f/tech_mag_courant.html
- [18] <http://www-civa.cea.fr>
- [19] J.M. LEGER, T. THOMAS, D. DURET, H. JOISTEN, H. SIBUET, P. GAUD, J.M. FEDELI – *Integrated Microfluxgate Study an Characterization* – LETI (CEA-Grenoble / Technologies Avancées)
- [20] http://fr.wikipedia.org/wiki/Jean_Bernard_L%C3%A9on_Foucault
- [21] <http://www.obspm.fr/~expositions/Foucault/niveau2/2lesCourants.html>
- [22] http://www.gmw.com/magnetic_measurements/Bartington/Mag-01_Pricing.html

